QM

Holzheizwerke

Planungshandbuch

Erarbeitet von der Arbeitsgemeinschaft

QM Holzheizwerke



4. leicht überarbei tete Auflage

QM Holzheizwerke ist ein **Qualitätsmanagement-System** für Warmwasser- und Heisswasserheizungsanlagen auf Basis holzartiger Brennstoffe und Biomasse im **Leistungsbereich ab etwa 100 kW** zur Wärmeversorgung von Einzelobjekten oder Nah- und Fernwärmenetzen. Im Zentrum stehen die fachgerechte Konzeption, Planung und Ausführung der Wärmeerzeugungsanlage und des Wärmenetzes. Wichtige Qualitätskriterien sind hohe Betriebssicherheit, präzise Regelung, gute lufthygienische Eigenschaften und eine wirtschaftliche Brennstofflogistik. Das Ziel ist ein effizienter, emissionsarmer und wirtschaftlicher Betrieb der gesamten Anlage.

Das Qualitätsmanagement-System wurde 1998 in der Schweiz grundlegend entwickelt und sukzessive aufgebaut. Im Jahr 2004 wurde die internationale **Arbeitsgemeinschaft QM Holzheizwerke** gegründet, um gemeinsam Qualitätsstandards für Holzheizwerke mit der Bezeichnung QM Holzheizwerke anzubieten.

Das vorliegende **Planungshandbuch** erläutert den Projektablauf und zeigt, wie die Qualitätsziele für die Wärmeerzeugungsanlage und das Wärmenetz mittels fachgerechter Planung und Ausführung erreicht werden.

Das Planungshandbuch ist Teil der **Schriftenreihe QM Holzheizwerke,** in der bisher die folgenden Bände publiziert wurden:

Band 1: Q-Leitfaden (mit Q-Plan)
ISBN 978-3-937441-91-7

Band 2: Standard-Schaltungen – Teil I
ISBN 978-3-937441-92-4

Band 3: Muster-Ausschreibung Holzkessel
(Version Schweiz für einen Holzkessel)
ISBN 978-3-937441-87-0

Band 3: Muster-Ausschreibung Holzkessel
(Version Schweiz für zwei Holzkessel)
ISBN 978-3-937441-88-7

Band 4: Planungshandbuch
ISBN 978-3-937441-96-2

Band 5: Standard-Schaltungen – Teil II
ISBN 978-3-937441-95-5

Die Schriftenreihe ist über die Webseite der Arbeitsgemeinschaft QM Holzheizwerke (www.qmholzheizwerke.ch) frei verfügbar zu beziehen. Auf dieser Webseite sind auch weitere Dokumente, Software-Hilfsmittel und FAQs zu häufig auftretenden Fragen und aktuellen Weiterentwicklungen zum Thema Holzenergie zu finden. Einige Bände der Schriftenreihe wurden mit Unterstützung des EU-Interreg-Projekts ENTRAIN in Englisch, Italienisch und teilweise weitere Sprachen übersetzt (frei verfügbar, siehe www.qm-biomass-dh-plants.com).

energieschweiz

Hochschule für Forstwirtschaft Rottenburg
Hochschule für Angewandte Wissenschaften

Holzenergie SCHWEIZ

C.A.R.M.E.N.

AEE INTEC

APE Agenzia Per l'Energia del Friuli Venezia Giulia
www.ape.fvg.it

Schriftenreihe QM Holzheizwerke Band 4

Erarbeitet von der Arbeitsgemeinschaft
QM Holzheizwerke

Planungs-handbuch

Erarbeitet von der
Arbeitsgemeinschaft
QM Holzheizwerke

4. leicht überarbeitete Auflage

C.A.R.M.E.N. e.V. Straubing 2026

Arbeitsgemeinschaft QM Holzheizwerke

Für die Schweiz:
Holzenergie Schweiz mit finanzieller Unterstützung des Bundesamtes für Energie
www.qmholzheizwerke.ch
www.holzenergie.ch

Für Österreich:
AEE INTEC – Institut für Nachhaltige Technologien
www.klimaaktiv.at/qmheizwerke

Für Deutschland:
Baden-Württemberg: HFR – Hochschule für Forstwirtschaft Rottenburg
Bayern: C.A.R.M.E.N. e.V.
www.qmholzheizwerke.de

Für Italien:
APE FVG – Agenzia per l'Energia del Friuli Venezia Giulia
www.ape.fvg.it

Auf diesen Websites sind Hinweise und Publikationen zum Thema Holzenergie zu finden. Von hier können auch Software-Hilfsmittel heruntergeladen werden.

© Arbeitsgemeinschaft QM Holzheizwerke 2004–2026.
Auszugsweiser Nachdruck unter Quellenangabe gestattet.

QM Holzheizwerke®
ist ein eingetragenes Markenzeichen.

Team der Arbeitsgemeinschaft QM Holzheizwerke

Matthias Bendig, Bundesamt für Energie, CH

Laurent Audergon, Holzenergie Schweiz, CH

Stefan Thalmann (Leitung ARGE QMH), Verenum AG, CH
Jürgen Good, Verenum AG, CH
Daniel Zaugg, Verenum AG, CH

Andres Jenni, ardens GmbH, CH

Patrik Küttel, fokus-e gmbh, CH

Martin Kiener, EnOp GmbH

Christian Ramerstorfer, AEE INTEC, AT
Sabrina Metz, AEE INTEC, AT
Stefan Retschitzegger, AEE INTEC, AT

Wolfram Schöberl, C.A.R.M.E.N. e.V., DE
Christian Leuchtweis, C.A.R.M.E.N. e.V., DE
Sabine Hiendlmeier, C.A.R.M.E.N. e.V., DE
Matthias Wanderwitz, C.A.R.M.E.N. e.V., DE

Harald Thorwarth, HFR, DE
Johanna Eichermüller, HFR, DE

Matteo Mazzolini, APE FVG, IT
Matteo de Piccoli, APE FVG, IT

Autorenteam der dritten und vierten Auflage

Jürgen Good (Leitung), Verenum AG
Stefan Thalmann, Verenum AG
Thomas Nussbaumer, Verenum AG
Andreas Keel, Holzenergie Schweiz
Andres Jenni, ardens GmbH
Patrik Küttel, fokus-e gmbh
Harald Schrammel, AEE INTEC
Sabrina Metz, AEE INTEC
Christian Ramerstorfer, AEE INTEC
Jakob Binder, AEE INTEC
Gilbert Krapf, C.A.R.M.E.N. e.V.
Niels Alter, C.A.R.M.E.N. e.V.
Christian Letalik, C.A.R.M.E.N. e.V.
Harald Thorwarth, HFR
Johanna Eichermüller, HFR

Früheres Autorenteam (erste und zweite Auflage)

Jürgen Good (Koordination), Verenum AG
Friedrich Biedermann, BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH
Ruedi Bühler, Umwelt und Energie
Helmut Bunk, Klimaschutz- und Energieagentur (KEA-BW)
Thomas Deines, Ministerium für Ernährung und Ländlichen Raum Baden-Württemberg
Hans Rudolf Gabathuler, Gabathuler Beratung GmbH
Alfred Hammerschmid, BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH
Andres Jenni, ardens GmbH
Gilbert Krapf, C.A.R.M.E.N. e.V.
Thomas Nussbaumer, Verenum AG
Ingwald Obernberger, BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH
Bernhard Pex, C.A.R.M.E.N. e.V.
Christian Rakos, Energieverwertungsagentur E.V.A.

ISBN 978-3-937441-90-0 Schriftenreihe QM Holzheizwerke
ISBN 978-3-937441-96-2 Band 4: Planungshandbuch

Vorwort

Im Auftrag des Bundesamtes für Energie und einiger Kantone wurde 1998 durch Schweizer Fachleute ein Qualitätsmanagement-System für grössere Holzheizungsanlagen entwickelt und darauffolgend unter der Bezeichnung QS-Holzheizung sukzessive aufgebaut. Darauf aufbauend haben sich im Jahr 2004 Vertretungen aus der Schweiz, Österreich, Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz (nicht mehr aktiv) und ab 2020 auch Italien zur **Arbeitsgemeinschaft QM Holzheizwerke** zusammengeschlossen, um gemeinsam Qualitätsstandards für Holzheizwerke zu schaffen und diese unter der Bezeichnung QM Holzheizwerke anzubieten. Im Zentrum stehen die fachgerechte Konzeption, Planung und Ausführung der Wärmeerzeugungsanlage und des Wärmenetzes. Wichtige Qualitätskriterien sind hohe Betriebssicherheit, präzise Regelung, gute lufthygienische Eigenschaften und eine wirtschaftliche Brennstofflogistik. Das Ziel ist ein effizienter, emissionsarmer und wirtschaftlicher Betrieb der gesamten Anlage.

QM Holzheizwerke ist für Warmwasser- und Heisswasserheizungsanlagen auf Basis holzartiger Brennstoffe und Biomasse (Hackgut/Hackschnitzel, Rinde, Späne, Pellets usw.) im **Leistungsbereich ab etwa 100 kW** zur Wärmeversorgung von Einzelobjekten oder Nah- und Fernwärmenetzen konzipiert. Anlagen zur Stromerzeugung sind nicht berücksichtigt, jedoch wird empfohlen QM Holzheizwerke sinngemäss bzw. soweit möglich auch für solche Anlagen zu berücksichtigen.

Das vorliegende **Planungshandbuch ist Teil der Schriftenreihe QM Holzheizwerke**, erläutert den Projektablauf und zeigt, wie die Qualitätsziele für die Wärmeerzeugungsanlage und für das Wärmenetz mittels fachgerechter Planung und Ausführung erreicht werden. Es richtet sich insbesondere an Investorinnen und Investoren, Betreiberinnen und Betreiber sowie Planerinnen und Planer von Anlagen, vermittelt aber auch wichtige Grundlagen für Aus- und Weiterbildung, Forschung und Entwicklung sowie für Förderstellen und Entscheidungstragende aus Politik und Verwaltung. Das Planungshandbuch ist in vier Teile und einen ergänzenden Anhang gegliedert. Im ersten, einleitenden Teil werden die Grundgedanken für eine rationelle Energienutzung im Sinne von QM Holzheizwerke und erste Schritte der Projektentwicklung erläutert. Teil zwei umfasst die technischen und wirtschaftlichen Grundlagen für die Planung, den Bau und den Betrieb von Holzheizwerken. Im dritten Teil wird Schritt für Schritt der Planungsablauf bis hin zur Inbetriebsetzung und Abnahme der Anlage beschrieben. Der vierte Teil schliesslich vermittelt Know-how zu Betrieb, Bewirtschaftung, Optimierung und Modernisierung von Anlagen. Im Anhang sind weiterführende Informationen, Berechnungen und Hilfsmittel zusammengefasst und die wichtigsten Fachbegriffe in einem Glossar erläutert.

Um der fortlaufenden Entwicklung von Technologie und Know-how Rechnung zu tragen, wurde im Jahr 2022 die 3. Auflage des Planungshandbuches vom Team der ARGE QM Holzheizwerke vollständig überarbeitet, aktualisiert und ergänzt. Basis dafür ist der aktuelle Stand der Technik. Aktuell stärker aufkommende «neue Anlagenkonzepte» wie Mehrkesselanlagen mit Seriengeräten, Abgaskondensation in Kombination mit Wärmepumpen oder das Zusammenspiel von Holzheizwerken mit verschiedensten anderen zentral oder dezentral eingebundenen erneuerbaren Wärmequellen (Solarthermie, Geothermie, Abwärme, Wärmepumpe usw.) werden ebenso behandelt, sofern dazu bereits ausreichende und aus der Praxis bestätigte Erkenntnisse vorliegen.

Um die Lesbarkeit zu erhöhen und eine breitere, auch internationale Anwendung zu ermöglichen, wurden allgemein gültige Formulierungen bevorzugt und weitgehend auf länderspezifische Angaben und Textabschnitte verzichtet. Im Planungshandbuch wird soweit möglich auf international gültige Normen und Richtlinien verwiesen. Auf länderspezifische Normen, Gesetze und Regelwerke wird nicht explizit referenziert. Diese sind Teil des Anhangs.

In der vorliegenden 4. leicht überarbeiteten Auflage des Handbuchs gibt es, gleich wie im **deutschen Sprachraum,** mitunter verschiedene zur Anwendung kommende Begriffe und Bezeichnungen (z. B. Hackgut vs. Hackschnitzel, Holzheizwerk vs. Biomasseheizwerk), die jedoch allgemein verständlich sind. Die Rechtschreibung orientiert sich am Schweizer Sprachgebrauch, ebenso das Zahlenformat. Bezüglich detaillierter länderspezifischer Begriffsdefinitionen verweist die Autorenschaft explizit auf die entsprechenden nationalen Gesetze, Normen und Regelwerke.

Bei **Kostenangaben** kann dem unterschiedlichen Preisniveau in den verschiedenen Ländern nur bedingt Rechnung getragen werden. Hier gilt es, die jeweils spezifischen Erläuterungen zu Abbildungen und Angaben zu beachten und allenfalls das Preisniveau den nationalen Bedingungen entsprechend zu prüfen und anzupassen.

Die Inhalte für dieses Planungshandbuch wurden nach bestem Wissen und Gewissen erarbeitet und mit aller Sorgfalt auf Korrektheit geprüft. Die Autorenschaft kann dennoch keine Haftung oder Garantie für die Vollständigkeit, Aktualität, Richtigkeit und Qualität der bereitgestellten Informationen übernehmen. Das Planungshandbuch ersetzt keine detaillierte und projektspezifische Planung von Fachleuten und die Prüfung und Einhaltung der jeweils gültigen Normen und Rechtsvorschriften. Haftungsansprüche gegenüber der Autorenschaft, die sich auf materielle oder immaterielle Schäden beziehen, die durch die Nutzung des Planungshandbuches entstehen, sind grundsätzlich ausgeschlossen.

Das Autorenteam der ARGE QM Holzheizwerke bedankt sich bei den Erstautoren des Planungshandbuches, auf deren wertvoller und umfassender Arbeit die aktuelle Neuauflage aufbaut. Zudem sei den vielen Expertinnen und Experten der Branche für das wertvolle Feedback und die aktive Mitarbeit im Zuge der Vernehmlassung gedankt.

Ein besonderer Dank gilt auch den Pionieren der ARGE QM Holzheizwerke, Ruedi Bühler, Hans Rudolf Gabathuler und Franz Promitzer, für ihren Einsatz zur Entwicklung und Etablierung von Qualitätsstandards für Holzheizwerke.

Die Bearbeitung und Neuauflage des QM Holzheizwerke Planungshandbuches in den vier Sprachen DE / FR / IT / EN wurde durch die finanzielle bzw. personelle Unterstützung der folgenden Institutionen ermöglicht, wofür ihnen ebenfalls herzlich gedankt sei!

- Schweizerische Eidgenossenschaft, Bundesamt für Energie
- Holzenergie Schweiz, Zürich / Echandens / Avegno
- Österreichisches Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie
- APE FVG – Agenzia per l'Energia del Friuli Venezia Giulia
- C.A.R.M.E.N. e.V., Bayern
- Holzenergie-Fachverband Baden-Württemberg e.V.

ARGE QM Holzheizwerke, 30. Oktober 2026

Übersicht

TEIL 1 – RATIONELLE ENERGIENUTZUNG.....15
TEIL 2 – GRUNDLAGEN 29
TEIL 3 – PLANUNGSABLAUF 117
TEIL 4 – BETRIEB UND BEWIRTSCHAFTUNG 196
ANHANG 217

Inhaltsverzeichnis

TEIL 1 – RATIONELLE ENERGIENUTZUNG 15

1 HOLZ ALS ENERGIETRÄGER 16
1.1 Einleitung 16
1.2 Bedeutung der Holzenergie 16
1.2.1 Herkunft 16
1.2.2 Nutzung 16
1.3 Die Rolle der Holzenergie im Energiesystem 18
1.3.1 Bedeutung im internationalen Vergleich 18
1.3.2 Potenzial im zukünftigen Energiesystem 18
1.4 Fördermassnahmen für Holzenergie 19

2 QM HOLZHEIZWERKE 20
2.1 Ursprung und Zielsetzung 20
2.2 Weshalb QM Holzheizwerke? 20
2.3 QMstandard® 21
2.3.1 Wichtigste Personen 21
2.3.2 Aufgaben und Verantwortlichkeiten 21
2.3.3 Planungsablauf mit Meilensteinen 21
2.3.4 Q-Plan 22
2.3.5 Q-Leitfaden 22
2.3.6 Werkzeuge für Planerinnen und Planer 23
2.4 QMmini 24
2.4.1 Anwendungsbereich 24
2.4.2 Ablauf 24
2.4.3 Dokumente und Werkzeuge 24

3 PROJEKTENTWICKLUNG 25
3.1 Von der Idee zur Kilowattstunde 25
3.2 Machbarkeitsstudie 26
3.2.1 Standort Heizzentrale und Brennstofflager 26
3.2.2 Anforderungen Raumordnung bzw. Raumplanung 27
3.2.3 Brennstoffverfügbarkeit 27
3.2.4 Anschlussperimeter und Anschlussinteresse 27
3.2.5 Grobkonzept 27
3.2.6 Investitions- und Wärmegestehungskosten 27
3.3 Weitere Aspekte 28
3.3.1 Finanzierung 28
3.3.2 Betriebsgesellschaft 28
3.3.3 Erfolgsfaktoren und «Stolpersteine» 28

TEIL 2 – GRUNDLAGEN 29

4 ENERGIEHOLZ 30
4.1 Einleitung 30
4.2 Elementare Zusammensetzung von Holzbrennstoffen 30
4.3 Bezugszustände 30
4.4 Wichtige Kenngrössen 31
4.4.1 Wassergehalt und Holzfeuchte 31
4.4.2 Aschegehalt 32
4.4.3 Heizwert und Brennwert 32
4.4.4 Raummasse 33
4.5 Brennstoffbereitstellung für automatisch beschickte Holzfeuerungen 34
4.5.1 Übersicht 34
4.5.2 Energieholzsortimente 35

4.5.3 Brennstoffaufbereitung ... 37
4.5.4 Qualitätsparameter ... 39
4.5.5 Versorgungsstrategien ... 43
4.6 Analytik ... 44
4.7 Brennstofflieferver trag und Abrechnung ... 44
4.7.1 Brennstofflieferver trag ... 44
4.7.2 Abrechnung nach Volumen ... 45
4.7.3 Abrechnung nach Gewicht ... 45
4.7.4 Abrechnung nach erzeugter Wärmemenge ... 46

5 KOMPONENTEN DER WÄRMEERZEUGUNG ... 47
5.1 Einsatzgebiete ... 47
5.2 Grundlagen der Verbrennung ... 48
5.3 Feuerungstechnologien ... 48
5.3.1 Übersicht ... 48
5.3.2 Festbettfeuerungen ... 49
5.3.3 Wirbelschichtfeuerung ... 51
5.3.4 Staubfeuerung ... 52
5.4 Wärmeübertragung im Kesselteil ... 52
5.5 Automatische Kesselrohrreinigung ... 53
5.6 Entstehung von Emissionen ... 54
5.7 Primärmassnahmen zur Emissionsminderung ... 55
5.8 Sekundärmassnahmen zur Emissionsminderung ... 56
5.8.1 Entstaubung ... 56
5.8.2 Entstickung ... 58
5.9 Wärmerückgewinnung mit Economiser und Abgaskondensation ... 59
5.10 Prozessleittechnik ... 60
5.10.1 Grundlagen ... 60
5.10.2 Anforderungen an die messtechnische Ausstattung und Datenerfassung ... 63
5.10.3 Planung und Ausführung ... 64

6 KOMPONENTEN VON BRENNSTOFFLAGERUNG, -FÖRDERUNG UND ENTASCHUNG ... 66
6.1 Vorbemerkung ... 66
6.2 Brennstofflagerung ... 66
6.3 Befüllung von Silos und Lagerhallen ... 68
6.3.1 Befüllung von Holzschnitzelsilos ... 68
6.3.2 Befüllung und Bewirtschaftung von Lagerhallen ... 70
6.3.3 Befüllung von Spänesilos ... 72
6.3.4 Befüllung von Pelletlagern ... 72
6.4 Austragung ... 73
6.4.1 Austragungssysteme für alle Brennstoffe ... 73
6.4.2 Spezielle Austragungssysteme ... 75
6.5 Fördersysteme ... 76
6.6 Feuerungsbeschickung ... 78
6.7 Rückbrandsicherung im Brennstofffördersystem ... 78
6.8 Entaschung ... 79

7 HYDRAULIK DER WÄRMEERZEUGUNG ... 80
7.1 Hydraulische Grundlagen ... 80
7.2 Regelung Kesselkreis ... 80
7.2.1 Regelventil Kesselkreis ... 80
7.2.2 Bypass im Kesselkreis ... 82
7.3 Pumpen ... 83
7.3.1 Pumpenbauarten ... 83
7.3.2 Pumpenauslegung ... 83
7.3.3 Drehzahlgeregelte Kesselpumpe ... 84

7.3.4 Betriebssicherheit und Redundanz der Kesselpumpe ... 85
7.4 Wärmezähler ... 85
7.4.1 Merkmale von Wärmezählern ... 85
7.4.2 Anforderungen der einzelnen Durchflussmessverfahren ... 86
7.4.3 Einbau von Wärmezählern ... 87
7.4.4 Beeinflussung der Ventilautorität ... 87
7.5 Wärmespeicher ... 88
7.5.1 Wärmespeicher in der Heizzentrale ... 88
7.5.2 Hydraulische Einbindung Wärmespeicher ... 90
7.6 Fragen zur Hydraulik der Wärmeerzeugung ... 92
7.6.1 Wasserqualität ... 92
7.6.2 Vermeidung von Fehlzirkulation ... 92

8 KOMPONENTEN DER WÄRMEVERTEILUNG ... 93
8.1 Überblick ... 93
8.2 Rohrsysteme ... 93
8.3 Armaturen ... 93
8.4 Leckageüberwachung ... 94
8.5 Datenübermittlung und Kommunikation ... 95
8.6 Netzaufbau ... 95
8.7 Verlegemethoden und Verlegesituationen ... 95
8.8 Wasserqualität im Wärmenetz ... 96
8.9 Wärmeübergabe ... 96
8.9.1 Anschluss von Wärmekundinnen und -kunden ... 96
8.9.2 Anforderungen an die Wärmeübergabe ... 96

9 ASCHE ... 98
9.1 Ascheanfall ... 98
9.2 Aschefraktionen ... 98
9.3 Aschezusammensetzung ... 99
9.4 Entsorgung und Verwertung ... 100
9.4.1 Situation in der Schweiz ... 101
9.4.2 Situation in Deutschland ... 103
9.4.3 Situation in Österreich ... 104

10 WIRTSCHAFTLICHKEIT ... 105
10.1 Wirtschaftlichkeitsfragen bei Holzheizwerken ... 105
10.2 Verantwortlichkeiten ... 105
10.3 Kostenstruktur von Holzheizwerken ... 106
10.4 Wirtschaftlichkeitsrechnung ... 107
10.4.1 Einleitung ... 107
10.4.2 Berechnung der Wärmegestehungskosten mit der Annuitätenmethode ... 108
10.4.3 Barwertmethode (NPV) und interner Zinssatz (IRR) ... 109
10.4.4 Variantenvergleich ... 109
10.4.5 Sensitivitätsanalyse ... 110
10.5 Tarifstruktur Wärmeverkauf ... 110
10.6 Businessplan ... 112
10.6.1 Aufbau und Inhalte ... 112
10.6.2 Planbilanz und Planerfolgsrechnung ... 112
10.7 QM Holzheizwerke Berechnungstool Wirtschaftlichkeit ... 113
10.8 Abschätzung der Investitionskosten ... 115

TEIL 3 – PLANUNGSABLAUF ... 117

11 SITUATIONSERFASSUNG ... 118
11.1 Einleitung ... 118
11.2 Analyse des Wärmebedarfs ... 119
11.2.1 Neubauten ... 119

11.2.2 Bestehende Bauten ... 119
11.2.3 Baugebiete ... 120
11.3 Wärmebedarf der Gesamtanlage ... 122
11.3.1 Bestimmung des Wärmeleistungsbedarfs ... 122
11.3.2 Wärmeleistungsbedarf als Lastkennlinie dargestellt ... 123
11.4 Analyse von Wärmequellen ... 125
11.5 Einbindung in Projektablauf von QM Holzheizwerke ... 125

12 AUSLEGUNG DER WÄRMEVERTEILUNG ... 127
12.1 Einleitung ... 127
12.2 Kennzahlen und Begriffe ... 127
12.2.1 Potenzielles Versorgungsgebiet ... 127
12.2.2 Wärmebezugsdichte ... 128
12.2.3 Schlüsselkundinnen/-kunden ... 128
12.2.4 Erschliessungsgrad ... 129
12.2.5 Gleichzeitigkeitsfaktor ... 129
12.2.6 Anschlussdichte ... 129
12.2.7 Spezifische Investitionskosten ... 129
12.2.8 Wärmeverteilverluste ... 130
12.2.9 Abweichung von Effizienzkriterien ... 130
12.3 Projektablauf ... 130
12.4 Dimensionierung der Rohrdurchmesser ... 131
12.4.1 Empfehlungen zur Dimensionierung ... 131
12.4.2 Vorgehen bei der Dimensionierung ... 132
12.4.3 Berechnungsmethoden ... 132
12.5 Entwicklungen in der Wärmenetztechnologie ... 132

13 SYSTEMWAHL WÄRMEERZEUGUNG ... 135
13.1 Einleitung ... 135
13.2 Ökologischer Vergleich mit anderen Wärmeerzeugern ... 135
13.2.1 Übersicht ... 135
13.2.2 Beispiele ... 137
13.3 Allgemeine Anforderungen und Definition der wichtigsten Begriffe ... 141
13.4 Brennstoffqualität und Feuerungssystem ... 142
13.5 Auswahl und Auslegung des Wärmeerzeugungssystems ... 143
13.5.1 Grundvarianten von Wärmeerzeugungssystemen mit Holzfeuerungsanlage ... 144
13.5.2 Beschreibung der Grundvarianten ... 149
13.5.3 Vorgehensweise bei der Auslegung einer bivalenten Anlage ... 154
13.5.4 Auswahl des Feuerungssystems ... 154
13.5.5 Dimensionierung des Wärmespeichers ... 154
13.5.6 Brennstoffbedarf Holz ... 155
13.6 Weitere Varianten des Wärmeerzeugungssystems ... 156
13.6.1 Mehrkesselanlagen mit Standard-Seriengeräten ... 156
13.6.2 Zusatz-Holzkessel mit hoher Brennstoffqualität für Sommerbetrieb ... 157
13.6.3 Wärme-Kraft-Kopplung ... 158
13.7 Ergänzende Wärmequellen und Wärmeerzeugungssysteme ... 159
13.7.1 Allgemeine Bemerkungen ... 159
13.7.2 Wärmerückgewinnung aus dem Abgas ... 160
13.7.3 Wärmepumpen ... 163
13.7.4 Solarenergie ... 167
13.7.5 Abwärmenutzung ... 169
13.8 Bereitstellung von Prozesswärme ... 171
13.9 Auslegung der Anlagenkomponenten ... 172
13.9.1 Auswahl Staubabscheidung ... 172
13.9.2 Auswahl Stickoxidminderungsverfahren ... 174
13.9.3 Auswahl Zusatzkomponenten ... 175

13.10 Auslegung Heizzentrale 175
13.10.1 Heizzentrale 175
13.10.2 Heizcontainer und Heizzentrale als Fertigbauelement 177
13.10.3 Hilfsenergiebedarf 177
13.10.4 Schornstein, Kamin 177
13.10.5 Lärmschutz 178

14 AUSLEGUNG VON BRENNSTOFFLAGERUNG UND -FÖRDERUNG 180
14.1 Allgemeine Hinweise 180
14.2 Auswahl und Dimensionierung der Brennstofflagerung 180
14.2.1 Brennstofflagertypen 180
14.2.2 Dimensionierung 180
14.2.3 Auslegung Brennstoffsilo 182
14.2.4 Silobelüftung 183
14.2.5 Auslegung Lagerhalle 184
14.2.6 Aussenlager 185
14.2.7 Selbstentzündung und Substanzverluste 185
14.2.8 Auslegung Spänesilo 186
14.2.9 Auslegung Pelletlager 186
14.3 Auswahl und Dimensionierung der Brennstoffförderung 186
14.3.1 Allgemeine Bemerkungen 186
14.3.2 Brennstoffförderung 187
14.3.3 Austragung 187
14.3.4 Brennstofftransportsysteme 187
14.3.5 Feuerungsbeschickung 188
14.4 Auswahl und Dimensionierung der Entaschung 188

15 AUSFÜHRUNG UND ABNAHME DER HOLZKESSELANLAGE 190
15.1 Allgemeine Anforderungen und Definition der wichtigsten Begriffe 190
15.2 Bauüberwachung 190
15.3 Kritische Punkte während der Bauphase 191
15.4 Inbetriebsetzung und Inbetriebnahme 191
15.4.1 Vorbereitungen für die Inbetriebnahme, Kalt-Inbetriebnahme 191
15.4.2 Heiss-Inbetriebnahme der Anlage 192
15.5 Abnahme 193

TEIL 4 – BETRIEB UND BEWIRTSCHAFTUNG 196

16 BETRIEBSOPTIMIERUNG NACH DER INBETRIEBNAHME 197
16.1 Gründe und Zielsetzungen 197
16.2 Voraussetzungen und Verantwortlichkeiten 198
16.3 Datenaufbereitung und Beurteilung 198
16.4 Durchführung 201

17 BETRIEB UND INSTANDHALTUNG 203
17.1 Betriebsorganisation 203
17.2 Technischer Betrieb 203
17.3 Instandhaltung 203
17.3.1 Allgemeines 203
17.3.2 Wartung und Inspektion 204
17.3.3 Instandsetzung und Verbesserung 206
17.4 Arbeitssicherheit 206
17.5 Versicherungen 206

18 OPTIMIERUNG UND ERNEUERUNG BESTEHENDER ANLAGEN 208
18.1 Erläuterungen 208
18.2 Optimierung von bestehenden Anlagen 208
18.2.1 Vorgehen 208

18.2.2 Status-quo-Analyse von Technik und Ökonomie ... 208
18.2.3 Beurteilung der Resultate der Status-quo-Analyse ... 209
18.2.4 Massnahmen zur Optimierung von bestehenden Anlagen ... 212
18.3 Erneuerung von bestehenden Anlagen ... 214
18.3.1 Einleitung ... 214
18.3.2 Vorgehen bei einer Erneuerung ... 214
18.3.3 Erneuerung nicht möglich ... 216

ANHANG ... 217

19 VORSCHRIFTEN ... 218

20 WICHTIGE BERECHNUNGEN UND UMRECHNUNGEN ... 225
20.1 Luftüberschusszahl Lambda ... 225
20.2 Umrechnung von ppm auf mg/m^3 ... 226
20.3 Sauerstoffbezugsgrösse ... 227
20.4 Umrechnung von mg/m^3 auf mg/MJ ... 229
20.5 Umrechnung von feuchtem auf trockenes Abgas ... 230
20.6 Bestimmung der Nennwärmeleistung ... 231
20.7 Bestimmung des Brennstoffmassenstroms ... 232
20.8 Bestimmung der Verbrennungsluftmenge ... 233
20.9 Bestimmung des Abgasvolumenstroms ... 235
20.10 Bestimmung des NO_x-Massenstroms ... 236
20.11 Bestimmung des feuerungstechnischen Wirkungsgrades ... 238
20.12 Ermittlung des Jahresnutzungsgrades ... 240
20.13 Gebräuchliche Einheiten und Umrechnungen ... 243

21 GLOSSAR ... 244

22 LITERATUR ... 252

Teil 1 – Rationelle Energienutzung

1 Holz als Energieträger

1.1 Einleitung

Wälder sind wertvolle Ökosysteme – Lebens- und Arbeitsräume mit Nutz-, Schutz- und Erholungsfunktionen. Darüber hinaus leisten Wälder als CO_2-Senken und Holz als Rohstoff einen wichtigen Beitrag zur Reduktion von Treibhausgasen. Forst- und Holzwirtschaft sind bedeutende Wirtschaftszweige in Mitteleuropa und tragen zur Pflege der Kulturlandschaft bei. Dabei erfolgt die Waldwirtschaft auf der Basis einer naturnahen und nachhaltigen Forstwirtschaft. Dies bedeutet unter anderem, dass die ökologischen, ökonomischen und sozialen Leistungen des Waldes auf Dauer erbracht werden.

Holz ist einer der bedeutendsten nachwachsenden Rohstoffe. Die grosse Vielfalt der Holzarten und Holzprodukte und deren technische und gestalterische Eigenschaften ermöglichen ein breites Einsatzspektrum: Gebäude, Papier, Gebrauchsgegenstände – Holz übernimmt vielfach eine tragende Rolle.

Wieso Holzenergie?

Volkswirtschaftlich sinnvoll

- Diversifizierung der Energieversorgung
- Unabhängigkeit in Krisenzeiten
- Steigerung der Versorgungssicherheit
- Erträge für Wald- und Holzwirtschaft
- Regionale Wertschöpfung und Arbeitsplätze

Umweltverträglich

- Erneuerbar und CO_2-neutral
- Hohe Effizienz und geringe Emissionen
- Kurze und risikoarme Transportwege
- Einfache Aufbereitung und Lagerung
- Speicherbar und jederzeit verfügbar
- Mit anderen regionalen erneuerbaren Wärmequellen kombinierbar

Komfort durch Biomasse-Fernwärme

- Bewährte Technologie mit hoher Versorgungssicherheit
- Kein Wartungsaufwand und geringer Platzbedarf für Kundinnen und Kunden

Scheitholz wird seit Jahrtausenden als Wärmequelle für Heizen, Kochen, Handwerk, Dampferzeugung usw. eingesetzt. In den letzten Jahrzehnten hat Holz auch als Energieträger in Form von Hackschnitzeln und Pellets für Einzelfeuerungsanlagen und Fernwärmesysteme grosse Bedeutung gewonnen. Im Sinne einer ressourcenschonenden und kaskadischen Nutzung werden für die Hackschnitzel- und Pelletproduktion vorwiegend Energieholzsortimente sowie Nebenprodukte aus der Holzverarbeitung verwendet, die ansonsten ungenutzt bleiben würden. Bei der Verbrennung von Holz entsteht kein zusätzliches CO_2, da nur die während des Wachstums gespeicherte Menge an die Atmosphäre abgegeben wird.

1.2 Bedeutung der Holzenergie

1.2.1 Herkunft

Neben der Hauptquelle Wald werden kleine Teile des Holzbedarfs der EU und ihrer Mitgliedsländer aus recyceltem Altholz und Holzimporten gedeckt. Die industrielle Holzverarbeitung zu diversen Produkten erfolgt vor allem in der Säge-, Platten- und Papierindustrie und nachgelagerten Betrieben (Schreinereien, Zimmereien, Möbelfabrikation usw.) und hat gegenüber der energetischen Holznutzung Vorrang. Energieholz wird aus Schwachholz, Schadholz (z. B. aus Sturmschäden oder Borkenkäferbefall), Altholz, aber auch Holz aus Kurzumtriebsplantagen oder (privaten) Kleinwäldern gewonnen. Der restliche Holzanteil für die energetische Nutzung setzt sich aus für die Industrie ungeeigneten Holzfraktionen zusammen (Rinde, Kappholz, Sägemehl, Späne, Ablauge der Zellstoffproduktion). Insgesamt liegt der Anteil der energetischen Nutzung des gesamten Holzaufkommens in der EU bei rund 60 %. Bild 1.1 gibt einen Überblick über die Holzströme in der EU im Jahr 2015. Für eine nachhaltige Holzenergienutzung ist eine regionale Nutzung mit möglichst geringen Transportwegen wichtig. Dementsprechend sind die verfügbaren Brennstoffsortimente und deren Herkunft stark von regionalen Rahmenbedingungen und Wertschöpfungsketten abhängig.

1.2.2 Nutzung

Mehr als 50 % des Endenergiebedarfs in der EU entfallen auf Wärme. Innerhalb des Wärmesektors entfallen jeweils rund 40 % auf Haushalte und Industrie, der Rest verteilt sich auf den Dienstleistungssektor, die Landwirtschaft und Sonstige [1].

Die Holzenergie spielt eine Schlüsselrolle in der Energiewende – besonders in der Wärmeerzeugung. Aber auch das Interesse an der Nutzung von Holz und anderer fester Biomasse zur Erzeugung von Strom, Treibstoffen oder chemischen Produkten ist im Steigen begriffen. Rund 17 % des Endenergiebedarfes der EU werden mit erneuerbarer Energie abgedeckt (Bild 1.2). Hier beträgt der Anteil der Bioenergie inklusive Holzenergie, Energiepflanzen und biogener Abfälle rund 60 %. Der grösste Teil der Bioenergie wird für die Bereitstellung von Wärme genutzt (74.6 %). Der Rest entfällt auf die Erzeugung von Strom und Treibstoffen.

Für die **Wärmeerzeugung** in Ein- und Mehrfamilienhäusern kommen meist manuell beschickte Feuerungsanlagen (Scheitholz, Holzbriketts usw.) oder automatische Pellet- oder Hackschnitzelheizungen zum Einsatz. Dafür stehen neueste und vielfach erprobte Feuerungs- und Kesseltechnologien mit hoher Effizienz und niedrigen Emissionen von einer Vielzahl an Herstellern zur Verfügung. Mit Biomasse-Fernwärmesystemen, bestehend aus Heizwerk, Wärmeverteilnetz und Wärmeübergabestation, können Wärmeverbünde von einigen wenigen Gebäuden bis hin zu grossen Städten mit Wärme (Heizung, Warmwasser, Prozesswärme) versorgt werden, die aus der Verbrennung von Hackgut, Rinde usw. in

vollautomatisierten und auf die jeweils eingesetzten Brennstoffsortimente abgestimmten Biomassefeuerungs- und Kesselanlagen bereitgestellt wird. Biomasse-Einzelfeuerungen werden auch in Grossanlagen für die Prozesswärme- und Dampferzeugung in der Industrie eingesetzt oder als Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen (WKK-Anlage) auch zur Stromproduktion genutzt. Nebenprodukte aus der holzverarbeitenden Industrie (z. B. Sägenebenprodukte, Laugen) werden häufig gleich vor Ort thermisch verwertet. Überschüsse aus der Strom- und Wärmeproduktion lassen sich wiederum in bestehende Energienetze einspeisen.

Die **Stromerzeugung** aus Biomasse kann mittels Verbrennung (Dampfturbinen, ORC) oder Vergasung (Gasmotoren) im Festbett- oder Wirbelschichtverfahren erfolgen. War die Stromerzeugung ursprünglich vorwiegend für grössere Anlagen konzipiert (Anlagen ab 400 kW), sind inzwischen auch Holzvergaseranlagen im Klein- und Kleinstleistungsbereich marktreif. Ein ökologisch und ökonomisch sinnvoller Betrieb erfordert zwingend eine kombinierte Nutzung der bei der Stromproduktion anfallenden Wärme und eine hohe thermische und elektrische Jahresauslastung.

Das bei der Holzvergasung erzeugte Synthesegas kann nicht nur für die kombinierte Strom- und Wärmeproduktion, sondern auch zur Herstellung von Treibstoffen und anderen Chemikalien verwendet werden oder in aufbereiteter Form in Erdgasnetze eingespeist werden. Je nach Anlagenkonzept und Betriebsart können neben Holzgas auch Holzkohle oder Pyrolyseöl als zusätzlich verwertbare Nebenprodukte oder Biokohle als CO_2-Senke anfallen.

Wie auch immer die Produktpalette und Konfiguration aktueller und zukünftiger Anlagen zur Holznutzung aussehen, Wärme wird immer als Nebenprodukt anfallen, die vollständig genutzt werden muss, um eine ressourcenschonende und effiziente Betriebsweise der Anlagen sicherzustellen.

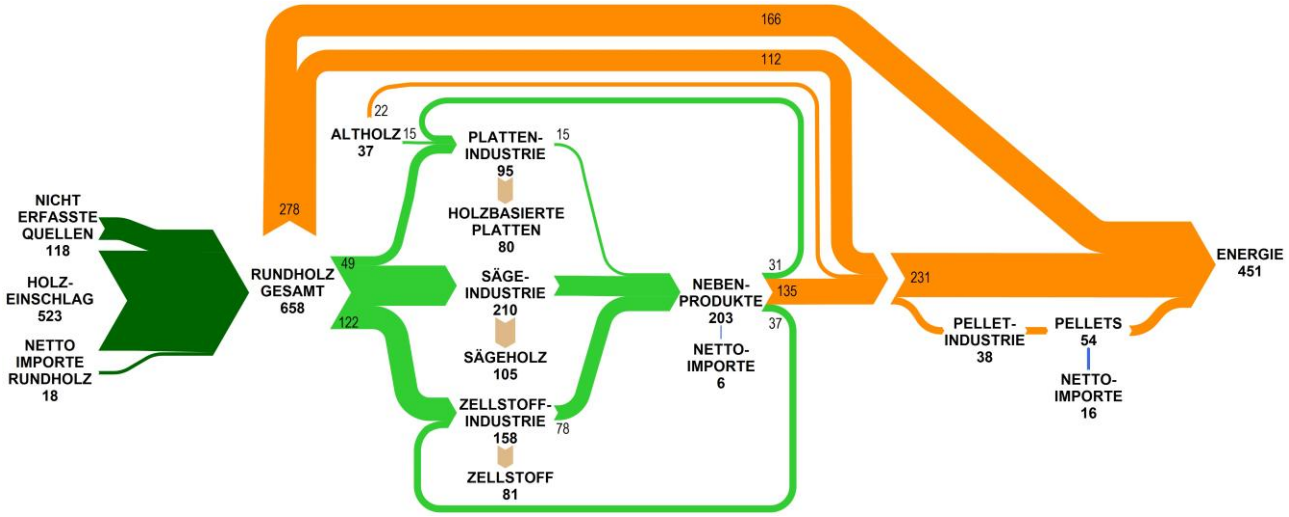


Bild 1.1 Holzflussdiagramm für den waldbasierten Sektor der EU-28-Länder in Millionen Erntefestmeter (2015); Basisdaten der Abbildung aus ([2], [3]).

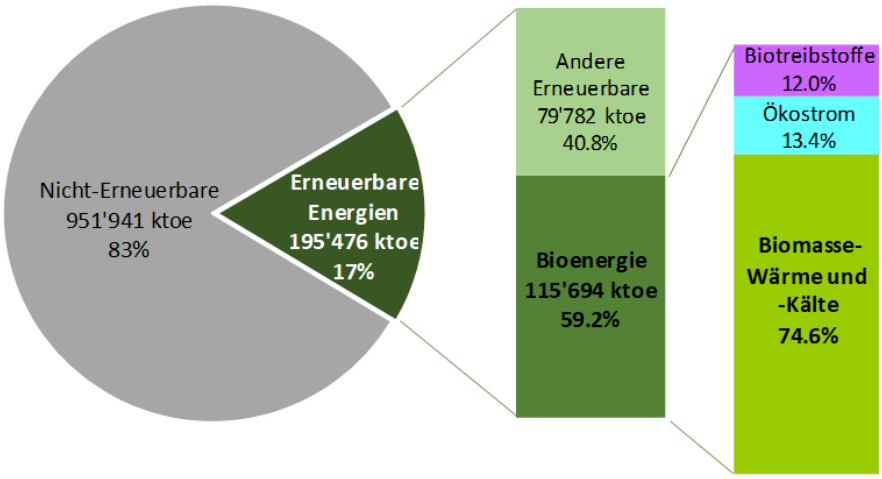


Bild 1.2 Anteil der erneuerbaren Energien am Bruttoendenergiebedarf der EU in Kilotonnen Öläquivalent (ktoe) und Prozent sowie Aufschlüsselung des Beitrags der Bioenergie (2016); Basisdaten der Abbildung aus [4].

1.3 Die Rolle der Holzenergie im Energiesystem

1.3.1 Bedeutung im internationalen Vergleich

2017 betrug der weltweite Durchschnittsverbrauch an Primärenergie in etwa 60 kWh pro Tag und Person, innerhalb der EU-Staaten lag dieser Wert 2018 mit 100 kWh deutlich höher ([1], [5], [6], [7]). Auch wenn der Anteil der erneuerbaren Energien über die letzten Jahre kontinuierlich gestiegen ist, werden nach wie vor rund 85 % der Gesamtenergieversorgung der EU durch nicht erneuerbare Ressourcen gedeckt (Tabelle 1.1). In den meisten Ländern stellt die Holzenergie als Teil der Bioenergie den grössten Anteil der Erneuerbaren dar (feste Primärbiomasse). Sie nimmt in der Transformation hin zu einer erneuerbaren Energieversorgung vor allem im Wärmesektor eine wichtige Rolle ein, da ihre Eigenschaften denen von fossilen Energieträgern am ehesten gleichen (hohe Wärmedichte, Lagerfähigkeit, Flexibilität). Innerhalb der EU haben Finnland, Schweden, Lettland, Estland und Österreich die grössten Anteile von Bioenergie bezogen auf die Einwohnerzahl zu verzeichnen [4].

Tabelle 1.1 Zusammensetzung der Energiequellen für die Gesamtenergieversorgung weltweit [5], in der EU und in ausgewählten Ländern (2018) [1]; Daten der Schweiz aus [8].

* Summenwert für Windkraft, Solarenergie und Sonstige

Gesamtenergieversorgung 2018	Welt	EU-28	DE	AT	CH	IT
Gesamt [TWh]	**166'098**	**18'742**	**3'543**	**386**	**304**	**1'781**
Nichterneuerbare Energieträger	**86.2 %**	**85.0 %**	**85.9 %**	**69.9 %**	**78.8 %**	**80.9 %**
Erneuerbare Energieträger	**13.8 %**	**15.0 %**	**14.1 %**	**30.1 %**	**21.2 %**	**19.1 %**
Bioenergie	9.3 %	9.0 %	8.5 %	16.7 %	7.4 %	8.7 %
feste Primärbiomasse (inkl. Holz)	-	*6.2 %*	*4.0 %*	13.9 %	3.8 %	5.6 %
Wasserkraft	2.5 %	1.9 %	0.5 %	9.8 %	12.3 %	2.7 %
Windkraft		2.0 %	3.1 %	1.6 %	0.04 %	1.0 %
Solarenergie	2.0 %*	0.9 %	1.5 %	0.9 %	0.9 %	1.4 %
Sonstige		1.2 %	0.5 %	1.1 %	0.6 %	5.2 %

Aber nicht nur technisch, sondern auch wirtschaftlich nimmt die Holzenergie eine Sonderstellung ein. Während andere erneuerbare Technologien grösstenteils auf direkte und kostenlose Energiequellen (Wind, Sonne, Wasser, Umgebungs- oder Erdwärme) zurückgreifen können, erfordert die Bereitstellung von Holzbrennstoffen zusätzliche Aktivitäten wie Anbau, Ernte, Aufbereitung und Transport. Durch die längere Wertschöpfungskette werden dauerhaft zusätzliche regionale Arbeitsplätze im Bereich der Brennstoffversorgung geschaffen. Im weltweiten Vergleich der Arbeitsplatzeffekte von erneuerbaren Energieträgern steht die Energiegewinnung aus fester Biomasse mit 787'000 generierten Arbeitsplätzen im Jahr 2018 an sechster Stelle [9]. In der EU rangierte die Energiegewinnung aus fester Biomasse im Jahr 2018 an erster Stelle. Mit 360'600 Arbeitsplätzen im Bereich feste Biomasse (von insgesamt 1.5 Millionen Arbeitsplätzen im Bereich erneuerbarer Energieträger) wurde ein Umsatz von 31.8 Milliarden Euro generiert [10].

1.3.2 Potenzial im zukünftigen Energiesystem

In zahlreichen Studien und Energiestrategien wird der Bioenergie (fest, flüssig und gasförmig) eine Schlüsselrolle als Ersatz für fossile Energieträger beigemessen. Dafür sprechen vor allem der Energieinhalt, die Lagerfähigkeit und die flexible Verfügbarkeit sowie die grösstenteils regionale Aufbringung von Biomasse. Eine vollständige Deckung des weltweiten Energiebedarfs aus Biomasse scheint aus heutiger Sicht unwahrscheinlich, ohne in Zielkonflikte hinsichtlich Biodiversität, Nachhaltigkeit, Flächen-, Wasser- und Nahrungsmittelbedarf zu geraten. Dennoch wird Biomasse eine tragende Säule unserer zukünftigen Energieversorgung sein. Aktuell liegt der weltweite Bioenergieanteil bei etwa 15'447 TWh/a (entspricht 9.3 % der Gesamtenergieversorgung, siehe Tabelle 1.1). Entsprechend einer vergleichenden Literaturstudie von Faaij et al. [11] wird das globale Bioenergiepotenzial für 2050 auf maximal bis zu 139'000 TWh/a eingeschätzt, wobei auch der Energiebedarf bis dahin auf 222'000 bis 417'000 TWh/a ansteigen wird. Das europäische Potenzial für 2050 wird hingegen auf maximal bis zu 8'300 TWh/a geschätzt. Diese Zahlen sind als Richtwerte zu sehen, die je nach regionaler Verfügbarkeit unterschiedlich ausfallen können.

Auch wenn Holz zukünftig stärker für die Produktion von Treibstoff, Holzgas oder chemischen Grundstoffen eingesetzt wird (Stichwort «Bioökonomie»), bleibt der Brennstoff Holz ein wesentlicher Bestandteil der erneuerbaren Strom- und Wärmeversorgung. Da das Holzpotenzial aber nicht für eine vollständig erneuerbare Energieversorgung ausreichen wird, ist grosser Wert auf effiziente Holzheizwerke und eine ressourcenschonende und nachhaltige Nutzung von Holz als Energieträger zu

legen. Im Fall von Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen zur Produktion von Strom und Wärme ist eine vollständige Wärmenutzung und somit ein wärmegeführter Betrieb unabdingbar.

Zur Erreichung einer vollständig erneuerbaren Wärmeversorgung wird es darüber hinaus unerlässlich sein, auch andere regionale und erneuerbare Wärmequellen (Solarthermie, Geothermie, Abwärme und Umgebungswärme mit/ohne Wärmepumpen) zu nutzen. Holzheizwerke und Nahwärmenetze sind dabei ein idealer Ausgangspunkt, um diese Wärmequellen einzubinden und nutzbar zu machen. Da dies jedenfalls zu komplexeren Anlagenkonfigurationen und Interaktionen zwischen verschiedenen Wärmequellen führt, ist es umso wichtiger, ein grosses Augenmerk auf eine umfassende und detaillierte Planung unter besonderer Berücksichtigung der Anforderungen der einzelnen Wärmeerzeuger sowie deren effizienten und emissionsarmen Zusammenspiels zu legen.

1.4 Fördermassnahmen für Holzenergie

Um eine rasche Transformation zu einer vollständig erneuerbaren Energieversorgung voranzutreiben und ungünstige Rahmenbedingungen zu kompensieren (z. B. fehlende oder zu geringe CO_2-Preise), werden Holzenergieanlagen in vielen Ländern gefördert. Die innerhalb der EU gängigsten Fördermassnahmen sind [12]:

- Investitionsförderungen (nicht rückzahlbare Zuschüsse, vergünstigte Darlehen)
- Einspeisetarife (Fixpreise)
- Einspeiseprämien (Aufschläge auf Marktpreise, Betriebskostenzuschüsse)
- Steuerbefreiungen oder -erleichterungen
- Steuerrückerstattung
- Gesetzliche Regulierungen (z. B. CO_2-Emissionshandel, Vorgaben für erneuerbaren Anteil, CO_2-Bepreisung)

Im Stromsektor kommen vor allem Einspeisetarife und Einspeiseprämien, aber zunehmend auch Einmalvergütungen zur Anwendung, während im Wärmesektor Investitionsförderungen dominieren. Demgegenüber kommen steuerliche Begünstigungen eher seltener zur Anwendung. Seit dem Pariser Klimaabkommen von 2015 wurden vermehrt auch gesetzliche Vorgaben zur Förderung von erneuerbarer Energie verabschiedet. Dazu zählt der Ausstieg aus Heizöl, Erdgas und Kohle oder Vorgaben für einen Anteil erneuerbarer Energie im Wohnbau. Insgesamt wurde der Bioenergiesektor von der EU und ihren Mitgliedsstaaten 2018 mit rund 14 Mrd. Euro gefördert (insgesamt 73 Mrd. € für erneuerbare Energieträger) [13]. Etwa 8 % der gesamten Förderungen innerhalb der EU im Energiebereich werden für Biomasse aufgewendet, während immer noch mehr als 30 % (oder 50 Mrd. €) an Förderungen in fossile Energieträger fliessen.

Gefördert werden je nach Land der Neubau, Ausbau und die Optimierung beziehungsweise die Erneuerung von Biomasseheizwerken und der zugehörigen Nah- und Fernwärmenetze sowie auch gewerbliche und private Biomasse-Einzelanlagen. Die Fördersätze für Investitionsförderungen liegen dabei häufig in der Grössenordnung von 20 % bis 40 %. Gängige Fördervoraussetzungen mit Fokus auf den Wärmesektor sind:

- Mindestanteil an erneuerbaren Energieträgern im Gesamtsystem
- Effizienz von Kessel, Wärmenetz und Gesamtsystem (z. B. Benchmarks für Kesselnutzungsgrad, Netzverluste)
- Ausreichende Anschlussdichte des Verteilnetzes
- Maximal zulässige Rücklauftemperatur
- Minimale CO_2-Einsparung
- Strengere Emissionsvorgaben als gesetzlich vorgeschrieben
- Energieträgerwechsel von fossil auf erneuerbar
- Kombination mit thermischer Gebäudesanierung
- Qualitätsmanagement QM Holzheizwerke (www.qmholzheizwerke.ch)
- Andere qualitätssichernde Vorgaben

Aktuelle und detaillierte Informationen zu Förderungsmöglichkeiten und Förderungsabwicklung sind bei den jeweils zuständigen nationalen und regionalen Förderstellen einzuholen.

Die Einführung von nationalen/internationalen CO_2-Preisen, wie in einzelnen Ländern bereits umgesetzt, stellt eine wirksame Ergänzung und Alternative zu Förderungen dar, um die Umstellung auf eine nachhaltige erneuerbare Wärmeversorgung auf Basis von Biomasse und anderen erneuerbaren Energiequellen zu forcieren.

2 QM Holzheizwerke

2.1 Ursprung und Zielsetzung

Die Schweiz, Baden-Württemberg, Bayern und Österreich haben gemeinsam Qualitätsstandards für Holzheizwerke geschaffen und bieten diese unter der Bezeichnung «QM Holzheizwerke» seit 2004 an. Im Zentrum stehen die fachgerechte Konzeption, Planung und Ausführung der Wärmeerzeugungsanlage und des Wärmenetzes. Wichtige Qualitätskriterien sind hohe Betriebssicherheit, präzise Regelung und gute lufthygienische Eigenschaften. Das Ziel ist ein energieeffizienter, umweltfreundlicher und wirtschaftlicher Betrieb der gesamten Anlage.

Bei QM Holzheizwerke handelt es sich um ein projektbezogenes Qualitätsmanagement. Es stellt sicher, dass in einem zeitlich begrenzten Projekt, an dem mehrere Unternehmen beteiligt sind, die geforderte Qualität festgelegt und geprüft wird.

2.2 Weshalb QM Holzheizwerke?

Holzheizungsanlagen, insbesondere solche mit Wärmenetzen, sind langfristige Unternehmungen mit hohem Investitionsbedarf und langen Abschreibungszeiten. Entsprechend hoch sind die Risiken. Es ist oft schwierig, die Entwicklung der Nachfrage vorauszusehen, weil die Bautätigkeit – sowohl im Neubau- als auch im Sanierungsbereich – starken Schwankungen unterworfen ist. Ebenso heikel sind Prognosen über die künftige Energiesituation, die sich aktuell in einem Wandel hin zu einer erneuerbaren, fossilfreien Wärmeerzeugung befindet.

Ein professionelles Projektmanagement ist deshalb eine unverzichtbare Voraussetzung, um ein grösseres Holzheizwerk mit Wärmenetz erfolgreich zu realisieren und zu betreiben. Integrale Bestandteile des Projektmanagements sind das Qualitätsmanagement, dargelegt in Form eines Dokuments, in dem vor der Realisierung der Anlage die Qualitätsforderungen und die Verantwortlichkeiten festgelegt werden (Q-Plan), und die Prüfung der Wirtschaftlichkeit, zum Beispiel mit einem Businessplan. Sie bieten Gewähr, dass Anlagen gebaut werden, die bei tiefen Investitionskosten einen hohen Jahresnutzungsgrad erreichen, wartungs- und emissionsarm betrieben werden können sowie eine hohe Versorgungssicherheit bieten.

Dementsprechend eignet sich QM Holzheizwerke auch speziell für eine Verknüpfung mit Förderungen für Holzheizwerke und Wärmenetze. Nur durch eine gezielte Verknüpfung von Förderungen mit Qualitätsforderungen wird ein zielführender und langfristig nachhaltiger Einsatz von Fördermitteln sichergestellt. Beispielsweise ist in Österreich QM Holzheizwerke verpflichtend anzuwenden, um eine Investitionsförderung zu erhalten. Die Anwendung von QM Holzheizwerke in Kombination mit Förderungen wurde vom EU-Rechnungshof als «besonders empfehlenswertes Verfahren» bezeichnet [14].

QM Holzheizwerke stellt verschiedene Qualitätssicherungsverfahren zur Verfügung (Bild 2.1), die je nach Grösse und Komplexität für den Neubau einer Heizzentrale, eines Wärmenetzes, den Ersatz von Kesseln einer Heizzentrale oder die Erweiterung eines Wärmenetzes angewendet werden können:

- **QMstandard®**
  Das Standard-Verfahren umfasst mit fünf Meilensteinen (MS1 bis MS5) den gesamten Ablauf der Planung und Realisierung.
- **Vereinfachte Version von QMstandard®**
  Die vereinfachte Version umfasst unter gewissen Voraussetzungen innerhalb der Planung und Realisierung nur drei von fünf Meilensteinen.
  Beim Ersatz eines Holzkessels oder beim Ausbau eines Wärmenetzes können ausserdem vereinfachte Anforderungen innerhalb von einzelnen Meilensteinen angewendet werden.
- **QMmini® (qm:kompakt)**
  Dieses stark vereinfachte Verfahren läuft in zwei Phasen ab und kann nur für Anlagen ohne fossilen Zusatzkessel im vorgegebenen Leistungsbereich gemäss Bild 2.1 angewendet werden.

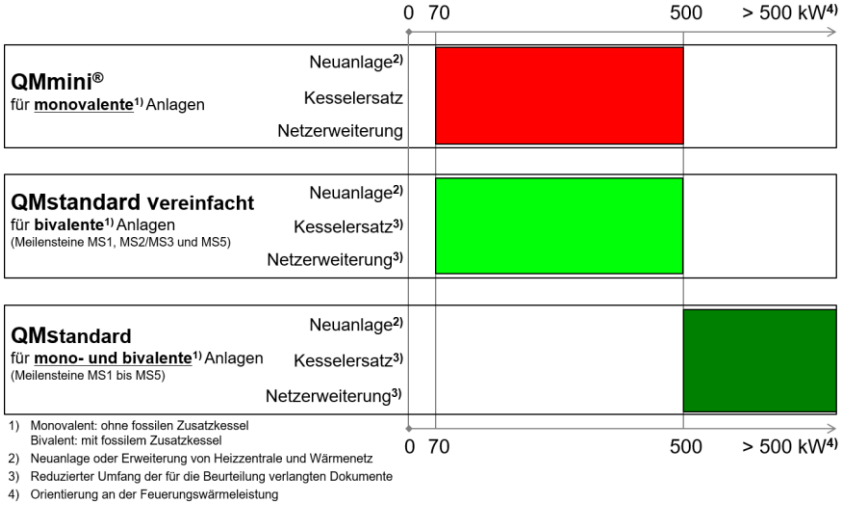


Bild 2.1 Grobe Orientierung für die Anwendung von QMstandard® und QMmini® in der Schweiz auf Basis der Feuerungswärmeleistung.

Basierend auf Erfahrungswerten hat QM Holzheizwerke Qualitätsforderungen (**Q-Forderungen**) festgelegt. Die wichtigsten beziehen sich auf die Grundlagenermittlung in der Situationserfassung, auf die Auslegung von Wärmenetz und Wärmeerzeugung, auf das Brennstoffsortiment sowie auf die Betriebsoptimierung.

Die Durchführung einer systematischen **Betriebsoptimierung** nach der Inbetriebnahme der Anlage ist ein integrierender, zwingend notwendiger Bestandteil der Qualitätssicherung mit QM Holzheizwerke. Im ersten Betriebsjahr müssen für unterschiedliche Betriebszustände die wichtigsten Betriebsdaten erfasst und ausgewertet werden. Sie bilden die Grundlage für den Nachweis, ob die Anlage die zu Beginn des Projekts vereinbarten Qualitätsforderungen (Q-Forderungen) erfüllt (siehe Kapitel 16).

2.3 QMstandard®

2.3.1 Wichtigste Personen

Die wichtigsten Personen für die Qualitätssicherung mit dem Verfahren von QM Holzheizwerke sind:

- Die **Bauherrschaft** oder eine bevollmächtigte Vertretung bestimmt den Qualitätsstandard und ist für die Wirtschaftlichkeit des Projektes verantwortlich.
- Der oder die Qualitätsbeauftragte (**Q-Beauftragte)** stellt sicher, dass das Qualitätsmanagementsystem «QM Holzheizwerke» festgelegt, verwirklicht und aufrechterhalten wird. Mit dieser Zielsetzung berät der oder die Q-Beauftragte die Bauherrschaft und die Hauptplanerin oder den Hauptplaner. Die Tätigkeiten umfassen die Qualitätsplanung, Qualitätslenkung und Qualitätsprüfung.
- Die **Hauptplanerin oder der Hauptplaner** ist gegenüber der Bauherrschaft im Rahmen der im Ingenieurvertrag festgelegten Planungsleistungen für die Qualität der Gesamtanlage (Holzheizwerk und Wärmenetz) verantwortlich. Für eine Projektierung nach QM Holzheizwerke muss zwingend eine Hauptplanerin oder ein Hauptplaner bezeichnet sein.

2.3.2 Aufgaben und Verantwortlichkeiten

Im üblichen Projektablauf fallen für die **Bauherrschaft** oder deren Vertretung folgende Aufgaben an:

- Ernennung der oder des Q-Beauftragten und Beauftragung der Hauptplanerin oder des Hauptplaners. Etablierung von QM Holzheizwerke – und zwar möglichst früh.
- Organisation des Projektes mit klaren Organisationsstrukturen sowie genau definierten Verantwortlichkeiten und Kompetenzen in allen Aufgabenbereichen.
- Regelung von Organisation und Rechtsform der Trägerschaft (Betriebsgesellschaft) des Holzheizwerkes.
- Wirtschaftlichkeitsnachweis, zum Beispiel mit Hilfe eines Businessplans.
- Sicherung der Finanzierung.
- Genehmigung der von den Projektbeteiligten vorgelegten Unterlagen.
- Beschaffung der notwendigen behördlichen Bewilligungen und Durchleitungsrechte.

Der oder die **Q-Beauftragte** hat folgende Aufgaben zu erfüllen:

- Alle administrativen Arbeiten in Zusammenhang mit QM Holzheizwerke: Einrichtung des QM-Systems in Zusammenarbeit mit Bauherrschaft und Hauptplanerin oder Hauptplaner, Organisation der notwendigen Sitzungen, Erstellung der von QM Holzheizwerke geforderten Dokumente.
- Qualitätsplanung: Unmissverständliche Festlegung der Qualitätsforderungen im Qualitätsplan (Q-Plan) in Zusammenarbeit mit Bauherrschaft und Hauptplanerin oder Hauptplaner; Sicherstellen, dass die im Q-Plan aufgeführten Q-Forderungen den anerkannten Regeln der Technik entsprechen.
- Qualitätsprüfung: Prüfung bei jedem Meilenstein, ob alle Unterlagen und Daten vorliegen und ob die im Q-Plan vereinbarten Qualitätsforderungen innerhalb der vereinbarten Toleranz liegen.
- Qualitätslenkung: Sicherstellen, dass Qualitätsabweichungen rechtzeitig erkannt und korrigiert werden; wenn Qualitätsabweichungen festgestellt werden, muss der oder die Q-Beauftragte zusammen mit Bauherrschaft und der Hauptplanerin oder dem Hauptplaner nach Möglichkeiten suchen, wie die Probleme gelöst werden können.

Der oder die Q-Beauftragte übernimmt keine rechtliche Verantwortung für die realisierte Anlage. Diese obliegt der Hauptplanerin oder dem Hauptplaner und den Herstellern jeweils im Rahmen ihrer Beauftragungen und in Letztverantwortung gegenüber der Bauherrschaft.

Die Hauptplanerin oder der **Hauptplaner** ist gegenüber der Bauherrschaft im Rahmen der im Ingenieurvertrag festgelegten Planungsleistungen für die Qualität des Holzheizwerkes verantwortlich. Die geforderte Qualität wird im Q-Plan von QM Holzheizwerke in sechs Teilbereichen festgelegt:

- Situationserfassung
- Wärmenetz
- Wärmeerzeugung
- Anlagedokumentation
- Abnahme
- Betriebsoptimierung

2.3.3 Planungsablauf mit Meilensteinen

Bild 2.2 gibt eine Übersicht über den Ablauf von QM Holzheizwerke und die Planungsschritte. Im Qualitätsleitfaden (Q-Leitfaden) sind Ablauf und Planungsschritte detailliert beschrieben (siehe Kapitel 2.3.5 und [15]).

Der oder die Q-Beauftragte wird von der Bauherrschaft bestimmt und übernimmt die Verantwortung für die Umsetzung von QM Holzheizwerke. Die Hauptplanerin oder der Hauptplaner wird ebenso von der Bauherrschaft be-

stimmt und ist für die Gesamtplanung der Anlage verantwortlich. Gemeinsam halten sie im Q-Plan-Hauptdokument (Meilenstein MS1) die Qualitätsforderungen fest. Der Planungsablauf wird grundsätzlich in fünf Projektphasen unterteilt. Bereits auf Stufe der Vorstudie wird mit Meilenstein 1 QM Holzheizwerke etabliert, damit möglichst früh mit der Qualitätsplanung (Q-Planung) begonnen werden kann. Die Meilensteine 2, 3 und 4 dienen dann der Qualitätsprüfung (Q-Prüfung) und Qualitätslenkung (Q-Lenkung) während des Projektablaufs. Damit wird sichergestellt, dass Qualitätsabweichungen rechtzeitig erkannt und korrigiert werden. Den Abschluss von QM Holzheizwerke bildet Meilenstein 5 nach mindestens einem Jahr Betriebsoptimierung.

Im Detail können der Ablauf und die Anwendung von QM Holzheizwerke in einzelnen Ländern an die dortigen Rahmenbedingungen angepasst werden, damit eine Übereinstimmung mit den jeweils üblichen Planungs- und Förderungsabläufen gegeben ist. Dies kann beispielsweise die Anpassung der Anwendungsbereiche und Bezeichnungen von QMstandard, von dessen vereinfachter Version, von QMmini oder die Anpassung beziehungsweise Ergänzung von einzelnen Dokumenten oder Qualitätskriterien bedeuten. Auf länderspezifische Anpassungen wird hier nicht näher eingegangen. Die jeweiligen nationalen Ansprechstellen von QM Holzheizwerke können dazu nähere Auskunft geben.

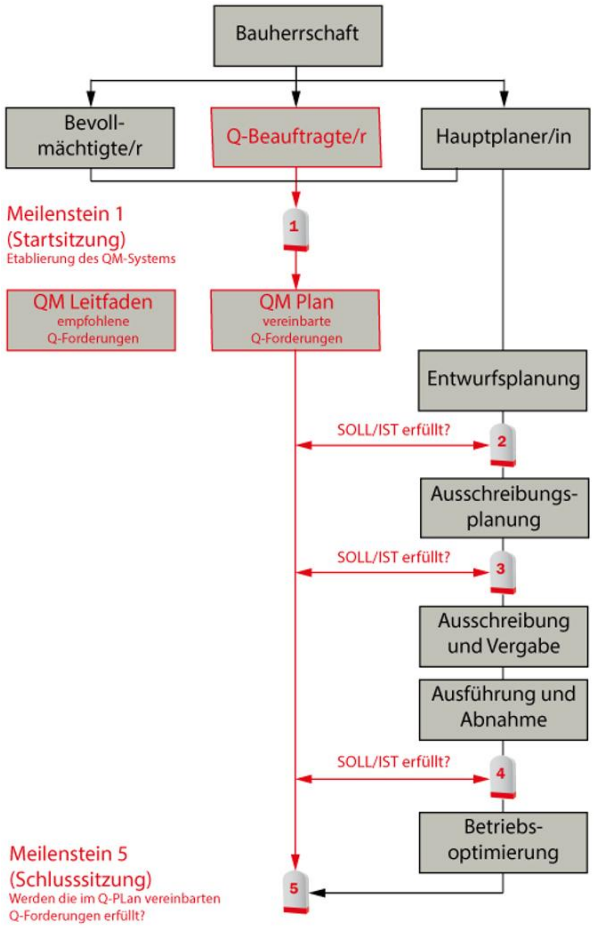


Bild 2.2 Ablauf von QM Holzheizwerke.

2.3.4 Q-Plan

QM Holzheizwerke soll mit möglichst wenig Dokumenten und administrativem Aufwand auskommen. Das zentrale Dokument ist der Q-Plan, bestehend aus zwei Teilen:

- dem Hauptdokument, das bei der Etablierung von QM Holzheizwerke in Meilenstein 1 erstellt wird. Hier werden vor der Realisierung der Anlage die Qualitätsforderungen und Verantwortlichkeiten projektspezifisch vereinbart und festgelegt.
- dem Zusatzdokument mit einer Excel-Tabelle, das bei Erreichen jedes weiteren Meilensteins von QM Holzheizwerke erstellt wird. Das Zusatzdokument dient der Qualitätsprüfung und Qualitätslenkung während des Projektablaufs.

2.3.5 Q-Leitfaden

Integrierender Bestandteil des Q-Plans ist der Q-Leitfaden [15]. Er beschreibt den Ablauf von QM Holzheizwerke. Zudem werden die Qualitätsforderungen detailliert beschrieben, die heutzutage an die Planung und den Bau eines Holzheizwerks mit Wärmenetz gestellt werden müssen. Q-Leitfaden und Q-Plan (Hauptdokument) weisen die gleiche Gliederung auf, sodass beide Dokumente sehr einfach und praxisgerecht parallel verwendet werden können:

A. Projektbeteiligte
B. Etablierung von QM Holzheizwerke
C. Projektablauf mit Meilensteinen
D. Leistungen Bauherrschaft
E. Leistungen und Q-Forderungen Hauptplaner/in
F. Brennstoffdefinition

Im Anhang enthält der Q-Leitfaden [15] folgende weitere Informationen:

- Spezielle Regelungen für Österreich
- Maximale Strömungsgeschwindigkeiten für Fernleitungsrohre
- Grafiken:
  - Verluste der Wärmeverteilung in Funktion der Anschlussdichte
  - Spezifische Kosten der Wärmeerzeugung
  - Spezifische Kosten der Wärmeverteilung
- Q-Forderungen zur Wärmeerzeugung (tabellarische Übersicht)
- Minimale Tagesheizlast für Schwachlastbetrieb
- Checklisten für Meilensteine MS1 bis MS5 gemäss QMstandard. Weitere Checklisten gibt es für Kesselersatz und Netzerweiterung.
- Q-Plan-Haupt- und Zusatzdokument (Muster)

2.3.6 Werkzeuge für Planerinnen und Planer

QM Holzheizwerke stellt weitere Planungswerkzeuge für Planerinnen und Planer zur Verfügung. Die wichtigsten sind:

- **Standardschaltungen:** Sammlung von bewährten Lösungskonzepten für Wärmeerzeugungsvarianten. Sie enthalten detaillierte Unterlagen wie Prinzipschemata mit Bezeichnung und Positionen der Messstellen, die hydraulische Auslegung der Kesselkreise, eine Funktionsbeschreibung der verschiedenen Regelkreise mit Regelschema, eine Messstellenliste zur Betriebsoptimierung sowie Vorgaben zur Datenaufzeichnung. Ausserdem enthalten sie Angaben zur Auslegung der Fernleitung und der Regelung der Fernleitungspumpen.
  Der Planerin oder dem Planer stehen Word-Dokumente zu den einzelnen Standardschaltungen zur Verfügung, die entsprechend dem Projekt ausgefüllt und angepasst werden.
- **Muster-Ausschreibung** für Anlagen mit einem oder zwei Holzkesseln: Der Planerin oder dem Planer steht ein Word-Dokument als Ausschreibungsvorlage zur Verfügung, welches die wesentlichen Elemente einer Ausschreibung enthält und das entsprechend dem Projekt ausgefüllt und angepasst wird.
- **Planungshandbuch** (vorliegend): Es bietet eine detaillierte Beschreibung des Planungsablaufs und des Standes der Technik für Holzheizwerke mit Wärmenetzen. Des Weiteren beschreibt es die Anforderungen an den optimalen Betrieb einer solchen Anlage und stellt grundlegendes Wissen für alle wichtigen Aspekte der Planung und für die wichtigsten Anlagenkomponenten bereit.
- **Checklisten** für Meilensteine MS1 bis MS5 gemäss QMstandard (Q-Leitfaden [15]): Sie beschreiben die beim jeweiligen Meilenstein einzureichenden Unterlagen/Dokumente. Checklisten für Neuanlagen, für Kesselersatz und für Netzerweiterung.
- Excel-Tabelle **Situationserfassung:** Im Tool werden die grundlegenden Daten der Wärmeabnehmer (Jahreswärmebedarf, Leistungsbedarf, Energiebezugsfläche) bezüglich Plausibilität kontrolliert. Die klimatischen Bedingungen des Anlagestandorts sowie Länge und Wärmeverluste der Fernleitung werden vorgegeben. Auf dieser Basis ermöglicht das Tool bereits zu Beginn des Projekts eine erste Auslegung von Wärmeerzeugung und Wärmeverteilung und prüft die Einhaltung der wichtigsten Q-Forderungen. Mit dem Fortschreiten der Planung werden die Daten in den weiteren Meilensteinen aktualisiert und jeweils erneut überprüft (siehe Kapitel 11).
- **Beratungstool Erneuerung Holzenergieanlagen:** Das Beratungstool Erneuerung Holzenergieanlagen ist eine Excel-Datei [16]. Hier können die wichtigsten anlagespezifischen Daten für die Beurteilung eingegeben werden. Nach der Eingabe erhält der Nutzer eine Grobanalyse durch eine automatische Datenauswertung mit Benchmarks. Mit dem Tool ist es möglich, Empfehlungen zu geben und auf weiterführende Hilfsmittel und Informationen zu verweisen. Es steht Planerinnen und Planern, Beraterinnen und Beratern sowie Anlagenbetreiberinnen und -betreibern zur freien Verfügung.
- Excel-Tool **Wirtschaftlichkeitsberechnung** (CH): Es dient zur Erstellung einer Planbilanz und Planerfolgsrechnung über eine Anlagenbetriebsdauer von 25 Jahren. Mit dem Tool können Tarifmodelle und die Kostenentwicklung über die Projektlaufzeit, wirtschaftliche Engpässe und der Erfolg des Projektes frühzeitig festgestellt werden (siehe Kapitel 10).
- **FAQs:** Die Arbeitsgemeinschaft QM Holzheizwerke stellt auf ihrer Webseite [17] weiterführende spezifische Informationen zu häufigen technischen Fragestellungen (FAQs) zur Verfügung.

Die Qualitätssicherung mit QM Holzheizwerke verlangt im Projektablauf den Austausch und das ständige Aktualisieren von Informationen und Dokumenten. Dies kann im einfachsten Fall per E-Mail und Papier erfolgen. Eine hilfreiche Alternative kann eine einfache Cloud-Lösung mit standardisierter Ordnerstruktur und spezifischen Zugriffsrechten sein, wo die QM-relevanten Dokumente eines Projekts abgelegt sind.

Datenbank als Hilfsmittel für den Projektablauf

In Österreich wurde aufgrund der Vielzahl an QM-Projekten eine Datenbank mit Web-Oberfläche entwickelt, über die der gesamte QM-Prozess abgewickelt wird. Damit wird gewährleistet, dass alle Projektbeteiligten sowie Förderstellen von Bund und Ländern auf die gleichen Informationen und Dokumente Zugriff haben und die gesamte Kommunikation und QM-Bearbeitung erleichtert werden:

- Zentraler Zugangspunkt für alle Projektbeteiligten (Bauherrschaft, Planungsunternehmen, Q-Beauftragte, Förderstellen, übergeordnetes QM-Management)
- Spezifische Zugriffsrechte je Projekt
- Rollenzuteilung und spezifische Berechtigungen entsprechend Q-Leitfaden für Bauherrschaft, Hauptplanerin/Hauptplaner und Q-Beauftragte
- Vollständige Abbildung und Dokumentation des gesamten QM-Prozesses inkl. Schreibschutz bei Meilensteinabschluss
- Upload- und Downloadfunktion für alle Dokumente
- Automatische Benachrichtigungen bei Meilenstein-Abschlüssen
- Upload und automatisierte Auswertung von jährlichen Betriebsberichten
- Ermöglicht übergeordnete Evaluierung der Qualitätsfortschritte der erfassten Holzheizwerke und Wärmenetze
- Direkte Kopplung mit der Förderungsabwicklung
- Wichtige Datengrundlage für Förderstellen, Politik und Verwaltungsbehörden

2.4 QMmini

2.4.1 Anwendungsbereich

QMmini wurde als Ergänzung zu QMstandard für Anlagen im Leistungsbereich von etwa 100 kW bis 500 kW entwickelt und wird seit 2011 angeboten. Damit sich die gleichen Qualitätsziele mit weniger Kontrollaufwand erreichen lassen können, wird der Anwendungsbereich nicht nur bezüglich der Leistung eingeschränkt, sondern auch auf einfache Systeme mit monovalenten Anlagen beschränkt, also auf Anlagen mit einem oder mehreren Holzkesseln. QMmini kann auch bei bestehenden Anlagen angewendet werden, z. B. beim Ersatz eines bestehenden Holzkessels oder bei der Erweiterung des bestehenden Wärmenetzes.

Bild 2.1 zeigt den Anwendungsbereich und die Abgrenzung zwischen QMmini und QMstandard.

2.4.2 Ablauf

QMmini läuft in zwei Phasen ab. In Phase 1 wird im Projektformular QMmini die Auslegung der Anlage überprüft. In Phase 2 werden, analog zu Meilenstein MS5, verschiedene Dokumente und Informationen zum Betriebsverhalten der Anlage überprüft und in der Abschlussmeldung QMmini festgehalten.

2.4.3 Dokumente und Werkzeuge

QMmini stellt für die Schweiz folgende Werkzeuge für Planerinnen und Planer sowie Installateurinnen und Installateure als Download zur Verfügung:

- Projektablauf Qualitätsbegleitung QMmini
- Leitfaden Qualitätsbegleitung QMmini
- Projektformular QMmini mit Beispiel (Excel-basiert).

In Österreich wird ein ähnliches Verfahren für «Nahwärmeanlagen» unter 400 kW unter dem Begriff qm:kompakt angeboten.

3 Projektentwicklung

3.1 Von der Idee zur Kilowattstunde

Am Anfang jedes Holzenergie-Projekts steht eine Idee. Diese kann ganz unterschiedliche Auslöser haben:

- Gute Beispiele
- Klimapolitische Zielsetzungen
- Anstehender Ersatz fossiler Heizungen (z. B. in öffentlichen Gebäuden)
- Absatzprobleme für qualitativ minderwertige Holzsortimente
- Politischer Auftrag
- Raumplanerische Vorgaben (z. B. Energierichtplan)
- Fachverbände, Energieagenturen, Planungsbüros

Der Weg «von der Idee bis zur Kilowattstunde Wärme oder Strom» ist erfahrungsgemäss lang, und oft resultiert nur aus einem kleinen Teil aller Ideen unmittelbar der Bau einer Anlage. Manchmal benötigt eine Idee mehrere Anläufe, bis die Zeit reif für die Projektumsetzung ist. Die Herausforderung besteht einerseits darin, frühzeitig und ohne grossen Aufwand Grundlagen zur Verfügung zu haben, welche einen Entscheid zwischen Weiterentwicklung und Abbruch des Projekts ermöglichen. Andererseits beginnt beim Entscheid zugunsten der Weiterentwicklung des Projektes die aufwendige Planungsphase. Die Herausforderung liegt hier darin, den nun eingeschlagenen Weg erfolgreich und ohne späteren Projektabbruch zu Ende zu führen. Eine Übersicht über den Ablauf der Projektentwicklung nach QM Holzheizwerke findet sich im Q-Leitfaden [15].

Zwischen der Idee und der Inbetriebnahme der Anlage geht es in erster Linie darum, **technische und wirtschaftliche** Fragen zu erörtern und Antworten darauf zu finden. Vor allem in der frühen Projektphase geht es aber immer auch um **nicht technische** Aspekte. Jedes grössere Holzenergieprojekt löst zwischenmenschliche Prozesse aus. Sei es beim Aufbau einer Betreibergesellschaft, bei der Akquisition von Wärmebezügerinnen und -bezügern oder beim Verkauf der Wärme. Die richtige Abwicklung dieser Prozesse kann mitunter genauso herausfordernd und entscheidend für den Projekterfolg sein wie die Wahl der richtigen Anlagentechnik.

Die frühe Projektphase ist entscheidend für die Etablierung von QM Holzheizwerke. Je früher die Standards und Empfehlungen von QM Holzheizwerke ins Projekt einfliessen, umso einfacher wird später ihre Umsetzung.

Bei der Entwicklung eines Holzenergie-Projektes sind verschiedene Personen und Gruppen (Stakeholder) beteiligt (siehe Bild 3.1). Diese haben nicht nur ungleiche Interessen, sondern auch unterschiedliche Perspektiven und Erwartungen. Entscheidend ist es, diese konstruktiv zusammenzuführen.

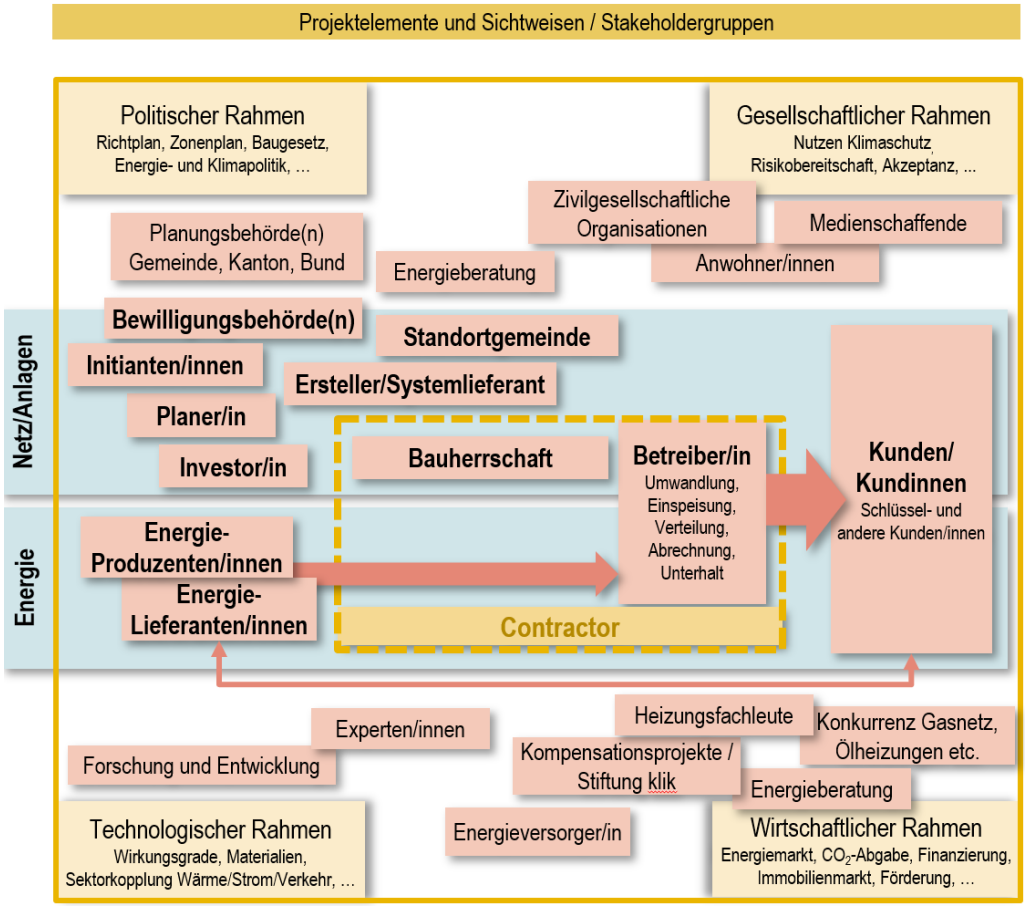


Bild 3.1 Projektelemente und Sichtweisen der verschiedenen Stakeholder [18].

3.2 Machbarkeitsstudie

Die Grundlage für den Grundsatzentscheid, ob eine Idee weiterverfolgt oder verworfen werden soll, ist in der Regel eine Machbarkeitsstudie (andere Bezeichnungen sind auch Vorstudie, Grobanalyse, Vorplanung, Projekt- und Planungsvorbereitung etc.). Die Machbarkeitsstudie dient dazu, belastbare Grundlagen zu schaffen, um zu entscheiden, ob ein Projekt umgesetzt wird oder nicht.

Da Holzenergieanlagen langfristige Infrastrukturprojekte mit einer hohen Anfangsinvestition sind, ist die Machbarkeitsstudie von grosser Bedeutung und sollte dementsprechend umfassend und von Fachleuten erstellt werden. Sie beinhaltet keine Detail- bzw. Ausführungsplanung und kann diese keinesfalls ersetzen.

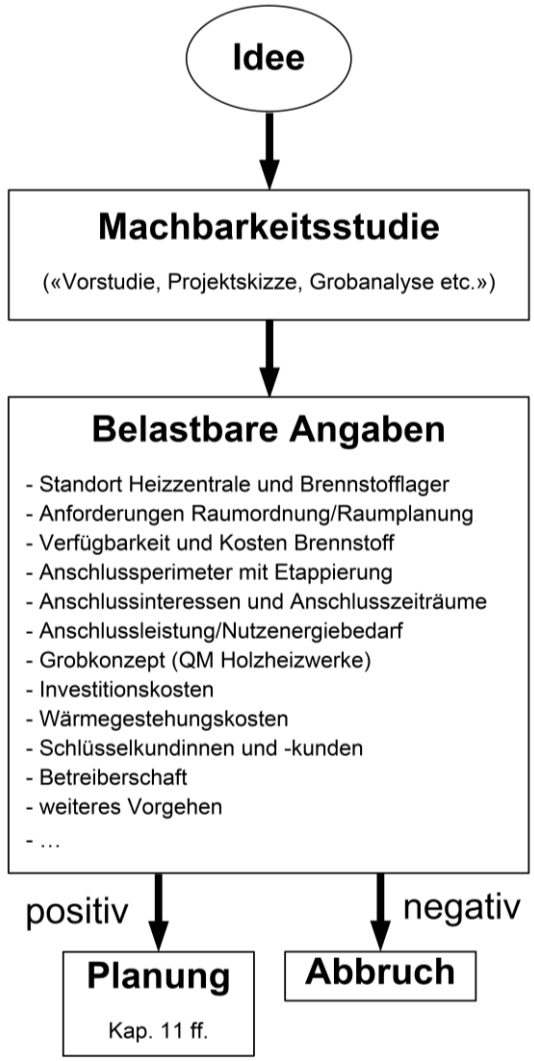


Bild 3.2 Einbindung der Machbarkeitsstudie in die Projektentwicklung.

Die Machbarkeitsstudie wird meist zu einem Zeitpunkt erstellt, wo vielfach noch keine Betriebsgesellschaft (Trägerschaft) besteht und eine spätere Projektumsetzung keineswegs gesichert ist. Dementsprechend stellt ihre Finanzierung oft eine Herausforderung dar. Wenn Kommunen oder Energieversorgungsunternehmen in die Projektidee involviert sind, können diese die Finanzierung übernehmen. Oft besteht auch die Möglichkeit, kostengünstige Beratungsleistungen von Fachverbänden, Energieagenturen u. a. zur Unterstützung der frühen Projektentwicklungsphase in Anspruch zu nehmen. Mitunter sind auch Planungsbüros Auslöser einer Projektidee und gehen in Vorleistung. Je nach länderspezifischen Rahmenbedingungen ist auch eine Beteiligung beziehungsweise Förderung von Bund, Ländern/Kantonen oder anderen Stellen an der Finanzierung möglich.

Bild 3.2 zeigt, welche Fragen im Rahmen einer Machbarkeitsstudie zu klären sind, damit ein Grundsatzentscheid möglich ist. Diese sind allerdings immer im Einzelfall zu definieren. Die Projektentwicklung und der weiterführende Planungsablauf können durch eine begleitende Risikoanalyse unterstützt werden, um potenzielle Risiken frühzeitig erkennen und berücksichtigen zu können.

3.2.1 Standort Heizzentrale und Brennstofflager

Aufgrund der intensiven Bautätigkeit und der vielerorts stattfindenden Ausdehnung der Wohngebiete wird es zunehmend schwieriger, geeignete Standorte für Heizzentralen und Brennstofflager zu finden. Ideal sind deshalb Standorte in Gewerbe- und Industriegebieten oder bestehende, ausbaubare Zentralen oder die Zusammenlegung von zwei oder mehreren bestehenden Heizzentralen. Für die Akzeptanz der weiteren Projektentwicklung ist es vorteilhaft, wenn bereits im Rahmen der Machbarkeitsstudie mehrere Standorte evaluiert werden. Die Evaluation möglicher Standorte für Heizzentrale und Brennstofflager gehört deshalb zu den ersten und wichtigsten Aufgaben im Rahmen der Projektentwicklung und sollte möglichst früh angegangen werden. Dies auch vor dem Hintergrund, dass heute immer mehr Leute von ihrem Einspruchsrecht Gebrauch machen. Je grösser die Anlage werden soll, desto bedeutender ist dieser Aspekt. Wenn sich kein Standort finden lässt, wird die Abklärung der übrigen Fragen unter Umständen obsolet. Die wichtigsten Kriterien für die Standortevaluation sind:

- Platzverhältnisse und vorhandene Infrastruktur (Strom, Wasser, Kanalisation, Telekommunikation etc.)
- Geeignete Zufahrt für Brennstoffanlieferung (z. B. Vermeidung der Zufahrt durch Wohngebiete, über Schulhöfe etc.)
- Versorgungssicherheit für Brennstoff und Betriebsmittel
- Topografie (z. B. ungünstig am Fuss von bewohnten Hanglagen)
- Windrichtung
- Besitzverhältnisse
- Nähe zum Versorgungsgebiet (Vermeidung langer Fernwärmeleitungen).

3.2.2 Anforderungen Raumordnung bzw. Raumplanung

Im Rahmen der Standortevaluation ist speziell auch die Konformität des vorgesehenen Standorts hinsichtlich der länder- und ortsspezifischen Rahmenbedingungen der Raumordnung bzw. Raumplanung zu prüfen. Standorte in der Landwirtschaftszone oder im Wald erfordern länderspezifisch strenge Bewilligungs- und Umzonungsverfahren (Umwidmungsverfahren). Die dafür benötigte Zeit ist für die Projektentwicklung zu berücksichtigen.

3.2.3 Brennstoffverfügbarkeit

Regionalität ist ein wichtiges Argument für die Entwicklung von Holzenergieprojekten. Deshalb sind die regionale Verfügbarkeit und Versorgungssicherheit des Brennstoffs frühzeitig abzuklären. Dazu gehören insbesondere auch die Qualität und die Kosten. Oft ist es angezeigt, mit potenziellen Brennstofflieferanten Vorverträge abzuschliessen. Bei grossen Holzheizwerken empfiehlt es sich, die Brennstoffversorgung im Rahmen von vertieften Studien abzuklären (siehe Kapitel 4).

3.2.4 Anschlussperimeter und Anschlussinteresse

Mit Hilfe der Wärmebezugsdichte beziehungsweise der Anschlussdichte (siehe Kapitel 12) lässt sich mit wenig Aufwand ein erster, provisorischer Anschlussperimeter festlegen. Idealerweise gruppiert sich dieser um feststehende, an einem Anschluss interessierte Grossbezügerinnen oder -bezüger (Schlüsselkundinnen/-kunden), welche das Gerüst des Wärmenetzes bilden. Das Anschlussinteresse im Umfeld der Schlüsselkunden wird, soweit noch nicht bekannt, mit Hilfe einer Umfrage ermittelt. Die wichtigsten Angaben sind:

- Grundsätzliches Anschlussinteresse
- Voraussichtlicher Anschlusszeitpunkt
- Durchschnittlicher bisheriger Endenergieverbrauch
- Alter der bestehenden Heizungsanlage
- Geplante Erweiterungen oder gebäudetechnische Sanierungen.

Die Frage nach dem grundsätzlichen Anschlussinteresse erfolgt zunächst ohne Angabe von verbindlichen Wärmepreisen, da diese erst ab einem gewissen Entwicklungsstand des Projektes detailliert ermittelt werden können. Die Antworten sind deshalb unverbindlich und wenig aussagekräftig. Der Anschlussentscheid hängt in erster Linie von den Wärmegestehungskosten ab. Diese hängen stark von der Anzahl, der Anschlussleistung und dem Zeitpunkt des Anschlusses der Anschlussliegenschaften ab. Dementsprechend wichtig sind die Schlüsselkunden. Das detaillierte Vorgehen ist auch im Planungshandbuch Fernwärme aufgeführt [19].

Mit Hilfe der Resultate der Umfrage lassen sich erste Richtwerte für Anschlussleistung und Nutzenergiebedarf ermitteln und eine erste Situationserfassung erstellen (siehe Kapitel 11).

3.2.5 Grobkonzept

Es empfiehlt sich, bereits sehr früh ein erstes Grobkonzept der Anlage zu erstellen. Dieses stellt sicher, dass einerseits die Standards und Anforderungen von QM Holzheizwerke und andererseits auch die jeweiligen gesetzlichen Vorschriften (z. B. Luftreinhaltung, Ascheentsorgung) schon von Anfang an berücksichtigt sind.

3.2.6 Investitions- und Wärmegestehungskosten

Die Abschätzung der Investitions- und Wärmegestehungskosten erfolgt aufgrund von Offerten, Erfahrungs- und Richtwerten. Die Wärmegestehungskosten ermöglichen es, die in der ersten Wärmebedarfserhebung angemeldeten, unverbindlichen Anschlussinteressen mit Kosten zu konkretisieren, um das Interesse potenzieller Wärmekundinnen und -kunden erneut abzufragen.

In der Praxis haben sich dazu Informationsveranstaltungen bewährt. Die Anwohnerinnen und Anwohner haben sich an der Umfrage beteiligt und erwarten anschliessend auch Informationen zu den Resultaten. Gleichzeitig dienen solche Veranstaltungen zur Akquisition zusätzlicher Kundinnen und Kunden.

Die Wärmekosten sollen bereits in Form eines dreiteiligen Wärmetarifs (siehe Kapitel 10.5) angegeben und den Kosten anderer Heizungsarten gegenübergestellt werden.

3.3 Weitere Aspekte

3.3.1 Finanzierung

Die Finanzierung der Investitionen erfolgt oft über einmalige Anschlussgebühren, über eigene Mittel, über Förderbeiträge und über Darlehen und Kredite, wobei im Idealfall etwa 25 % der Investitionskosten über einmalige Anschlussgebühren gedeckt werden. Bei einer Bürgschaft durch die öffentliche Hand werden die Konditionen der Bankdarlehen deutlich günstiger. Auch die Finanzierung über Vorsorgestiftungen (z. B. Pensionskassen), «grüne» oder nachhaltige Anlageformen (Fonds, Anleihen usw.) oder Bürgerbeteiligungsmodelle kann interessant sein.

3.3.2 Betriebsgesellschaft

Grundsätzlich kommen für die Betriebsgesellschaft folgende Gesellschaftsformen in Frage:

- Privates Unternehmen
  - Einzelunternehmen
  - Personengesellschaften (z. B. Gesellschaft bürgerlichen Rechts GbR)
  - Kapitalgesellschaften (z. B. Aktiengesellschaft AG, Gesellschaft mit beschränkter Haftung GmbH)
  - Genossenschaften
- Öffentliches Unternehmen
  - Nicht privatrechtliche Form (z. B. kommunaler Eigenbetrieb)
  - Privatrechtliche Form (z. B. rein öffentliche GmbH)

Welches die geeignetste Gesellschaftsform ist, hängt von verschiedenen Faktoren ab (Finanzierung, Struktur der Wärmekundinnen und -kunden, Rolle der öffentlichen Hand etc.) und ist immer im Einzelfall abzuklären. Falls sich keine eigene Betriebsgesellschaft bilden lässt, steht mit dem Contracting eine zusätzliche Alternative zur Verfügung.

3.3.3 Erfolgsfaktoren und «Stolpersteine»

Die wichtigsten **Erfolgsfaktoren** während der frühen Phase der Projektentwicklung sind gemäss dem Bericht «Sozioökonomische Aspekte thermischer Netze» [18]:

- Professionelle Projektentwicklung und Machbarkeitsstudie
- Berücksichtigung sozioökonomischer Aspekte
- Identifikation und Einordnung der Stakeholder hinsichtlich Motivation, Handlungsspielräumen und Entscheidungsmechanismen
- Frühe Klärung der Zuständigkeiten
- Kommunikation klarer Benchmarks von Anfang an (z. B. Zielwerte Anschlussdichte, Wärmegestehungskosten, erforderlicher Anschlussfortschritt etc.)
- Schlüsselkundinnen und -kunden
- Besichtigung bestehender, ähnlicher Beispiele durch Behörden, Anwohner und andere Interessierte
- Person, welche das Projekt vorantreibt
- Etappenweiser Ausbau der Zentrale und des Fernwärmenetzes
- Unterstützung durch öffentliche Hand
- Nutzen für den Wald aufzeigen (Sympathieträger)
- Frühzeitige, transparente Information
- Trümpfe der Holzenergie ausspielen: erneuerbar, CO_2-neutral und klimaschonend, regionale Wertschöpfung und andere mehr

Die wichtigsten **«Stolpersteine»** während der frühen Phase der Projektentwicklung sind gemäss dem Bericht «Risiken bei thermischen Netzen» [20]:

- Ungenügende oder verspätete Information
- Überschätzung des Anschlusspotenzials
- Einsprachen und Beschwerden
- Zeitdruck (Strassensanierungen, Schlüsselkunden usw.)
- Reduktion auf Einzelaspekt (z. B. Feinstaub)
- Angst vor Abhängigkeit
- Kommunikation schlechter Beispiele
- Negative Presse

Teil 2 – Grundlagen

4 Energieholz

4.1 Einleitung

Die Brennstoffqualität ist ein bedeutender Aspekt beim Betrieb von Holzenergieanlagen. Neben dem direkten Einfluss der Brennstoffkosten auf den wirtschaftlichen Betrieb wirkt sich die Beschaffenheit des eingesetzten Holzes auf den Betriebs- und Instandhaltungsaufwand sowie die Effizienz der Anlage und die Entstehung von Luftschadstoffen aus. In Lieferverträgen zwischen Anlagenbetriebsgesellschaften und Brennstofflieferanten werden daher vermehrt Qualitätsparameter vereinbart.

Neben anthropogenen Einflüssen (z. B. Verunreinigungen mit mineralischem Material wie Schotter oder Erde von Lagerplätzen) sind vor allem natürliche Parameter entscheidend für die Qualität des Energieholzes. Die natürlich bedingte Brennstoffzusammensetzung wirkt sich auf drei wesentliche Aspekte beim Betrieb von Holzenergieanlagen aus. Der Heizwert [MJ/kg] wird massgeblich von den brennbaren Holzbestandteilen Kohlenstoff und Wasserstoff bestimmt. Er sinkt mit steigenden Wasser- und Aschegehalten. Aschegehalt und -zusammensetzung beeinflussen Verschmutzungs- und Verschlackungsprozesse sowie Korrosionsvorgänge in der eingesetzten Anlagentechnik und wirken sich so auf den Instandhaltungsaufwand aus.

Hinsichtlich freigesetzter Emissionen sind in Zusammenhang mit der Brennstoffqualität Stickoxid- und Staubemissionen von Bedeutung. Weitere Abgasbestandteile (z. B. CO_2 oder CO) hängen nicht direkt vom eingesetzten Brennstoff ab [21]. Das folgende Kapitel soll Anlagenbetreiber in die Lage versetzen, Brennstoffqualitäten einzuschätzen.

4.2 Elementare Zusammensetzung von Holzbrennstoffen

Holz als Brennstoff besteht zu einem grossen Teil aus den Hauptelementen Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff (Tabelle 4.1). Je nach Brennstoffart können auch Stickstoff und Schwefel in Konzentrationen > 1 % vorkommen. Der Heizwert wird im Wesentlichen durch die Gehalte von Kohlenstoff und Wasserstoff bestimmt. Im Brennstoff gebundener Sauerstoff unterstützt den Oxidationsvorgang. Schwefel trägt zum Heizwert eines Brennstoffs bei und wird zu SO_2 oder SO_3 oxidiert. Nach der Verbrennung kann er zu weiteren Verbindungen weiterreagieren. Schwefeloxide (SO_x) stellen unerwünschte, da luftverunreinigende Emissionsbestandteile dar. Im Brennstoff gebundener Stickstoff ist der für Holzfeuerungen wesentliche Faktor bei der Bildung unerwünschter Stickoxid-Emissionen (NO_x).

Nebenelemente sind die massgeblichen Aschebildner. Der Aschegehalt eines Brennstoffs beeinflusst den Heizwert und wirkt sich in Verbindung mit der Anlagentechnik auf die Staubemissionen aus. Zudem sind Aschegehalt und Aschezusammensetzung wesentliche Einflussgrössen mit Bezug auf Verschmutzung und Verschlackung der eingesetzten Anlagentechnik. Besonderes Augenmerk liegt auf den Elementen Kalium, Natrium, Chlor und Schwefel. Die beiden Elemente Kalium und Natrium tragen zur Senkung des Ascheerweichungspunktes bei. Durch die Bildung von Alkalichloriden sind sie in Zusammenhang mit Verschmutzung und Verschlackung wesentlich an Korrosionsvorgängen (z. B. an Wärmeübertragerrohren) beteiligt. Aus dem im Brennstoff gebundenen Chlor können unerwünschte Verbindungen wie Chlorwasserstoff (HCl) sowie Dioxine und Furane (PCDD/F) gebildet werden. Chlor- und Schwefelverbindungen wirken korrosiv auf die Anlagentechnik.

Spurenelemente kommen in Holzbrennstoffen im Wesentlichen in Form von Schwermetallen vor, die während des Wachstums von Bäumen aus der Umwelt aufgenommen werden. Diese können in sehr unterschiedlichen Konzentrationen in Brennstoffen vorliegen und toxisch wirken. Nach der Verbrennung kondensieren oder ad-/absorbieren die (im Abgas dampfförmigen) Schwermetalle mit wenigen Ausnahmen auf Aschen. Sie sind somit in der Asche gebunden und können dem natürlichen Kreislauf entzogen werden (z. B. durch Deponierung oder Aufbereitung). Bei Holzbrennstoffen beeinflussen Schwermetalle die Aschequalität, insbesondere in Bezug auf deren Verwertbarkeit (siehe Kapitel 9).

4.3 Bezugszustände

Biogene Festbrennstoffe bestehen aus brennbaren und nicht brennbaren Substanzen. Nicht brennbare Anteile umfassen die Wasser- und Ascheanteile des Brennstoffs, der organische Anteil gibt in Oxidationsprozessen Energie ab. Während organische Substanz sowie Mineral- und Aschegehalte in Abhängigkeit von Standortbedingungen und Holzart gewöhnlich in einem bestimmten Wertebereich liegen, kann der Wassergehalt stark schwanken. Um Brennstoffanalysen vergleichen zu können, sind Bezugszustände definiert (Bild 4.1).

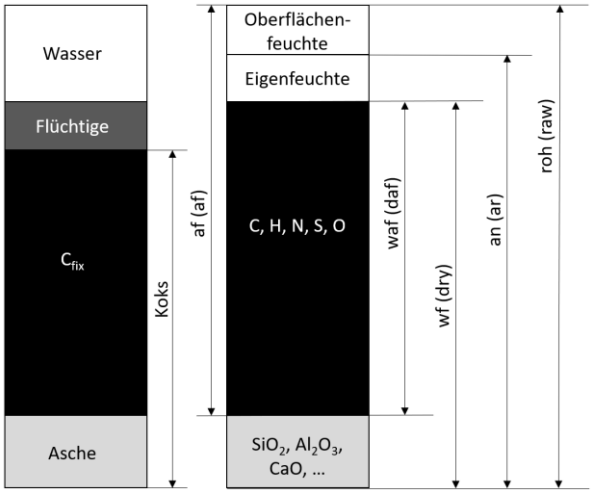


Bild 4.1 Bezugszustände fester Brennstoffe.
roh (raw): Rohzustand
an (ar): Analysenfeucht
wf (dry): Wasserfrei
af (af): Aschefrei
waf (daf): Wasser- und aschefrei

Tabelle 4.1 Elementare Zusammensetzung von Energieholz.

Kategorie	Hauptelemente	Nebenelemente	Spurenelemente
Elemente:	Kohlenstoff C Sauerstoff O Wasserstoff H Stickstoff N	Phosphor P Kalium K Natrium Na Schwefel S Calcium Ca Silicium Si Magnesium Mg Chlor Cl	Bor B Kupfer Cu Eisen Fe Mangan Mn Zink Zn Blei Pb Chrom Cr Arsen As Cadmium Cd weitere Elemente
Grössenordnung:	> 1 % bzw. > 10'000 mg/kg	0.01 - 1 % bzw. 100 - 10'000 mg/kg	< 0.01 % bzw. < 100 mg/kg
Einfluss auf:	Energiegehalt	Aschemenge/-verhalten, Emissionen, Korrosion	Ascheverwertung, Emissionen

Beispielsweise liegt der Heizwert für eine Brennstoffprobe im wasserfreien Zustand bei $H_{u,wf}$ = 19 MJ/kg. Bei Anlieferung am Heizwerk hätte die gleiche Probe im Rohzustand bei einem Wassergehalt von 50 % und einem Aschegehalt von 0.5 % einen Heizwert von $H_{u,roh}$ = 8.2 MJ/kg. Zur genauen Angabe von Analyseergebnissen für biogene Festbrennstoffe und für deren Vergleich werden fünf Bezugszustände unterschieden [22]:

- Rohzustand – roh (raw)
- Analysenfeucht – an (as received, ar): Probe im lufttrockenen Zustand
- Wasserfrei – wf (dry, d): Angabe bezieht sich auf den trockenen Brennstoff
- Aschefrei – af (ash free, af): Angabe bezieht sich auf den aschefreien Brennstoff
- Wasser- und aschefrei – waf (dry, ash free, daf): Angabe bezieht sich auf den wasser- und aschefreien Brennstoff.

Eine **Umrechnung von Analyseergebnissen** bezogen auf verschiedene Brennstoffzustände ist mit den folgenden drei Formeln möglich.

$$X_{wf} = \frac{x_i}{1 - \gamma_{H_2O,1}}$$

$$X_{waf} = \frac{x_i}{1 - \gamma_{A,1} - \gamma_{H_2O,1}}$$

X_i Kenngrösse im Bezugszustand i

γ_{Xi} Massenanteil des Brennstoffparameters X im Bezugszustand i [kg/kg]

Beim **Heizwert** wird die Verdampfungsenthalpie des im Brennstoff enthaltenen Wassers (2.441 MJ/kg H_2O) berücksichtigt.

$$H_{u,waf} = \frac{H_u + 2.441 * \gamma_{H_2O}}{1 - \gamma_A - \gamma_{H_2O}} \left[\frac{MJ}{kg}\right]$$

$$H_u = H_{u,waf} * \left(1 - \gamma_A - \gamma_{H_2O}\right) - 2.441 * \gamma_{H_2O} \left[\frac{MJ}{kg}\right]$$

4.4 Wichtige Kenngrössen

4.4.1 Wassergehalt und Holzfeuchte

Holzbrennstoffe enthalten immer einen gewissen Wasseranteil, der bedingt durch Holzart, Erntezeitpunkt, Lagerort und -dauer in einem weiten Rahmen streut und erheblichen Einfluss auf die Qualität der Holzverbrennung hat. Der Wassergehalt setzt sich zusammen aus der Oberflächenfeuchte des Holzes (u. a. bedingt durch äussere Einflüsse wie Niederschläge) und der Eigenfeuchte (eingelagertes Wasser in Zellwänden, Zellhohl- und Zellzwischenräumen).

Der Wasseranteil wird entweder als Wassergehalt oder Holzfeuchte (auch Holzfeuchtigkeit) angegeben. Diese Angaben unterscheiden sich durch ihre unterschiedlichen Bezugsgrössen. In Anlehnung an die DIN EN ISO 17225 erfolgt ihre Angabe in Massen-Prozent (m.-%) [23]. Der **Wassergehalt M** ist der wichtigste Qualitätsparameter für Holzbrennstoffe. Er beschreibt das im feuchten Brennstoff befindliche Wasser m_w, bezogen auf dessen Gesamtmasse, die sich aus der Masse des wasserfreien Brennstoffs m_B und des darin enthaltenen Wassers m_w zusammensetzt.

$$\gamma_{H_2O} = \frac{m_w}{m_B + m_w}$$

$$M = \frac{m_w}{m_B + m_w} * 100$$

γ_{H2O} Massenanteil des Wassers im Brennstoff [kg/kg]

M Wassergehalt [m.-%]

u Holzfeuchte [m.-%]

m_w Masse des Wassers im Brennstoff [kg]

m_B Masse Brennstoff [kg]

Dagegen beschreibt die **Holzfeuchte u** die im Brennstoff gebundene Menge Wasser m_w, bezogen auf die wasserfreie Menge Brennstoff m_B. Für u sind deshalb Werte > 100 % möglich.

$$u = \frac{m_w}{m_B} * 100$$

Im Bereich der energetischen Nutzung hat sich die Angabe des Wassergehalts weitgehend durchgesetzt. Die Angabe der Holzfeuchte ist ausserhalb der traditionellen Forstwirtschaft eher unüblich. Die Holzfeuchte kann aus dem angegebenen Wassergehalt errechnet werden und umgekehrt (Tabelle 4.2).

Tabelle 4.2 Umrechnung Wassergehalt M – Holzfeuchte u.

Wassergehalt M [%]	Holzfeuchte u [%]
0	0
20	25
25	33
40	67
50	100
60	150

4.4.2 Aschegehalt

Unter dem Aschegehalt versteht man die Menge an Asche, die bei der vollständigen Verbrennung des Brennstoffs zurückbleibt. Die in einem Brennstoff enthaltene Asche besteht aus dessen anorganischem Anteil, hauptsächlich den unter Kapitel 4.2 aufgeführten Nebenelementen wie beispielsweise Silicium, Kalium oder Natrium. Die Asche enthält zudem einen Grossteil der im Brennstoff enthaltenen Spurenelemente beziehungsweise Schwermetalle, die sich nach der Verbrennung auf den Aschen niederschlagen. Wenn beispielsweise die Eisen-Konzentration in einem Brennstoff bei 50 mg/kg (wf) liegt, erhöht sich bei einem Aschegehalt des Brennstoffs von 0.5 % (wf) (also 5 g Asche pro 1 kg wasserfreiem Brennstoff) die Eisen-Konzentration in der Asche (unter der Annahme, dass das Eisen vollständig als Fe_2O_3 in der Asche vorliegt) auf 10'000 mg/kg (Kapitel 9).

Der Aschegehalt A errechnet sich aus der Masse der im Brennstoff befindlichen Asche mA bezogen auf die Masse des eingesetzten Brennstoffs $m_{B,i}$ (unter Angabe des Bezugszustandes i).

$$\gamma_{Asche} = \frac{m_A}{m_{B,i}}$$

$$A = \frac{m_A}{m_{B,i}} * 100$$

γ_{Asche}	Massenanteil der Asche im Brennstoff [kg/kg]
A	Aschegehalt [m.-%]
m_A	Masse der Asche im Brennstoff [kg]
$m_{B,i}$	Masse des Brennstoffs im Bezugszustand [kg]

4.4.3 Heizwert und Brennwert

Die bei der (vollständigen) Verbrennung von Holzbrennstoffen freigesetzte Wärme wird als Brennwert oder Heizwert angegeben. Der Brennwert H_O (auch «oberer Heizwert») beschreibt die absolute Menge an freigesetzter Energie bei Verbrennung einer festgelegten Menge an Brennstoff [MJ/kg]. Dieser Wert beinhaltet neben der fühlbar freigesetzten Wärme auch die Energie, die sich in Form von Wasserdampf im Abgas befindet und durch Kondensation nutzbar gemacht werden kann («Brennwerttechnik»). In Holzfeuerungsanlagen entweicht das Wasser meist dampfförmig mit dem Abgas. Die bei der Kondensation freiwerdende Verdampfungsenthalpie des Wassers kann dadurch nicht genutzt werden. Der Energieinhalt von Holz wird daher in der Regel als Heizwert H_u (auch «unterer Heizwert») angegeben. Dieser Wert gibt den Energieinhalt eines Brennstoffs [MJ/kg] abzüglich der im Abgas in Form von Wasserdampf enthaltenen Energiemenge an. Er ist linear vom Wassergehalt des Brennstoffs abhängig (Bild 4.2). Tabelle 4.3 verdeutlicht den Einfluss des Wassergehalts auf den Heizwert.

Der Brennwert wird im Labor kalorimetrisch nach EN ISO 18125:2017-08 [24] ermittelt. Bei der Holzverbrennung entsteht Wasserdampf zum einen aus dem im Brennstoff enthaltenen Wasser und zum anderen aus der Reaktion des im Brennstoff gebundenen Wasserstoffs mit Sauerstoff. Um aus dem Brennwert H_O den Heizwert Hu zu berechnen, wird von H_O die Energiemenge abgezogen, die bei der Kondensation dieses Wasserdampfes frei wird.

$$H_u = H_O - h_V * \gamma_W \left[\frac{MJ}{kg}\right]$$

$$\gamma_W = \frac{M_{H_2O}}{M_{H_2}} * \gamma_{H_2} + \gamma_{H_2O} \left[\frac{kg}{kg}\right]$$

$$H_u = H_O - 2.441 * \left(8.937 * \gamma_{H_2} + \gamma_{H_2O}\right) \left[\frac{MJ}{kg}\right]$$

γ_W	Spezifischer Wassergehalt der Abgase bei vollständiger Verbrennung [kg/kg]
h_V	Verdampfungsenthalpie des Wassers h_V = 2.441 MJ/kg
M_i	Molare Masse des Brennstoffparameters i [kg/kmol]
γ_i	Massenanteil des Brennstoffparameters i [kg/kg]

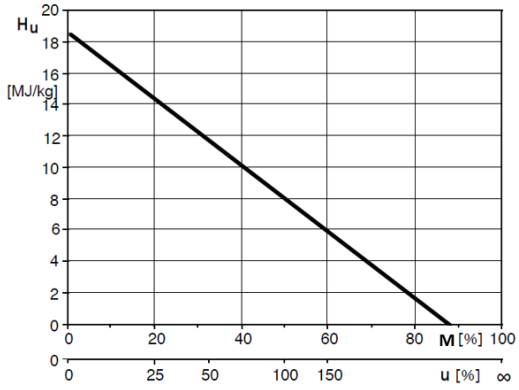


Bild 4.2 Heizwert von Holz in Funktion des Wassergehalts M und der Holzfeuchte u.

Tabelle 4.3 Heizwert von Holz in Abhängigkeit des Wassergehalts M für verschiedene Baumarten und Masseinheiten. Annahme für Heizwert in kWh/kg (wasserfreie Bezugsbasis): 5.2 für Weichholz und 5.0 für Hartholz [25].

Wassergehalt M in [m.-%]		**0**	**5**	**10**	**15**	**20**	**25**	**30**	**35**	**40**	**45**	**50**	**55**	**60**
Baum-art/Dichte[1)]	**Mass-einheit**	**Heizwert in Abhängigkeit des Wassergehalts M**												
	kWh/kg	5.20	4.91	4.61	4.32	4.02	3.73	3.44	3.14	2.85	2.55	2.26	1.97	1.67
Fichte	kWh/fm	1'971	1'957	1'942	1'925	1'906	1'885	1'860	1'832	1'799	1'760	1'713	1'656	1'584
379 kg_{wf}/fm	kWh/rm	1'380	1'370	1'360	1'348	1'334	1'319	1'302	1'282	1'259	1'232	1'199	1'159	1'109
	kWh/Srm	788	783	777	770	763	754	744	733	720	704	685	662	634
	kWh/kg	5.20	4.91	4.61	4.32	4.02	3.73	3.44	3.14	2.85	2.55	2.26	1.97	1.67
Kiefer	kWh/fm	2'241	2'226	2'209	2'189	2'168	2'144	2'116	2'083	2'046	2'001	1'948	1'883	1'802
431 kg_{wf}/fm	kWh/rm	1'569	1'558	1'546	1'533	1'518	1'500	1'481	1'458	1'432	1'401	1'364	1'318	1'261
	kWh/Srm	896	890	883	876	867	857	846	833	818	801	779	753	721
	kWh/kg	5.00	4.72	4.43	4.15	3.86	3.58	3.30	3.01	2.73	2.44	2.16	1.88	1.59
Buche	kWh/fm	2'790	2'770	2'748	2'723	2'695	2'664	2'627	2'586	2'537	2'480	2'411	2'326	2'221
558 kg_{wf}/fm	kWh/rm	1'953	1'939	1'923	1'906	1'887	1'864	1'839	1'810	1'776	1'736	1'687	1'628	1'555
	kWh/Srm	1'116	1'108	1'099	1'089	1'078	1'065	1'051	1'034	1'015	992	964	930	888
	kWh/kg	5.00	4.72	4.43	4.15	3.86	3.58	3.30	3.01	2.73	2.44	2.16	1.88	1.59
Eiche	kWh/fm	2'855	2'835	2'812	2'786	2'758	2'726	2'689	2'646	2'596	2'537	2'467	2'380	2'273
571 kg_{wf}/fm	kWh/rm	1'999	1'984	1'968	1'951	1'931	1'908	1'882	1'852	1'817	1'776	1'727	1'666	1'591
	kWh/Srm	1'142	1'134	1'125	1'115	1'103	1'090	1'075	1'058	1'038	1'015	987	952	909
	kWh/kg			4.43	4.15	3.86	3.58	3.30	3.01	2.73	2.44	2.16	1.88	1.59
Pappel	kWh/fm			1'738	1'723	1'705	1'685	1'662	1'636	1'605	1'569	1'525	1'472	1'405
353 kg_{wf}/fm	kWh/rm			1'217	1'206	1'193	1'179	1'163	1'145	1'123	1'098	1'067	1'030	983
	kWh/Srm			695	689	682	674	665	654	642	627	610	589	562

[1)] Werte für kg (wf) je fm ohne Trockenschwund (Raumdichte) [26]
Die Heizwerte für den Raummeter (rm) wurden pauschal mit 0,7 fm/rm und für den Schüttraummeter (Srm) Hackschnitzel mit 0,4 fm/Srm (Stückigkeit P16S) berechnet

4.4.4 Raummasse

Wie in Kapitel 4.4.3 gezeigt, ist der Heizwert auf die Masse des Brennstoffs bezogen und stark vom Wassergehalt abhängig. Das Wägen gelieferter Brennstoffmengen ist allerdings bei kleineren Anlagen oft nicht möglich, da die Infrastruktur fehlt bzw. zu teuer ist. Deshalb ist es besonders bei kleineren Anlagen üblich, Brennstoffmengen auf Volumenbasis abzuschätzen und so abzurechnen. Es gibt unterschiedliche Volumenangaben/Raummasse aus der Forst- und Holzwirtschaft, die im Zusammenhang mit Energieholz gebräuchlich sind (siehe Tabelle 4.4).

Tabelle 4.4 Raummasse für Energieholz [27].

Raummass	**Definition**	**Einheit**
Festmeter	Stehender Holzvorrat, 1 fm entspricht 1 m^3 fester Holzmasse, bei geschichtetem Holz ohne Zwischenräume	fm, m^3
Raummeter Ster	Geschichtetes Holz; es entspricht 1 m^3 einschliesslich der Zwischenräume (rund 0.8 fm)	rm
Schüttraummeter Schüttkubikmeter	Lose geschüttete Holzmenge; wird für Scheitholz, Hackschnitzel, Späne o. Ä. verwendet (rund 0.4 fm)	Srm, Sm^3

Ein wichtiger Parameter ist die **Schüttdichte** eines Brennstoffs [kg/Srm]. Diese wird hauptsächlich von der physikalischen Dichte des Brennstoffs [kg/m^3], die stark von Holzart und Wassergehalt abhängt, beeinflusst. Die Schüttdichte berücksichtigt zusätzlich die Stückigkeit des aufbereiteten Brennstoffs. Bei Hackschnitzeln und Schreddergut beeinflusst diese entscheidend die Zwischenräume in einer Brennstoffschüttung. Die Dichte oder Schüttdichte bestimmen zusammen mit dem Heizwert die volumenbezogene Energiedichte [MJ/m^3] oder [kWh/m^3] eines Brennstoffs (siehe Tabelle 4.5). Dies ist ein wichtiger Parameter, um Lager- und Transportaufwand abzuschätzen. Aus Brennstoffdichte ρ und Raumvolumen V lässt sich die Brennstoffmasse m berechnen ($m = V * \rho$).

Die Schüttdichte gilt allerdings als sehr ungenaue Grösse, da sie von vielen Einflussfaktoren abhängt. Dabei gilt grundsätzlich, dass uneinheitliche Brennstoffabmessungen die Schüttdichte verringern. Die Homogenität des Hackguts wird sowohl vom Brennstoffaufbereitungsverfahren als auch vom Ausgangsmaterial beeinflusst. Eine Aufbereitung mittels Schredder oder langsam laufenden Hackern führt zu länglichen, inhomogenen Brennstoffabmessungen mit vielen Spreisseln und zerfaserten Bruchstellen. Die Schüttdichte von solchem Material ist geringer als bei schnell laufenden Trommelhackern, deren Hackgut tendenziell glattere Kanten und

einen höheren Feinanteil aufweist. Während Hackschnitzel aus Stammholz gleichmässige Abmessungen haben, enthält Durchforstungsrestholz oder Landschaftspflegeholz unterschiedlich feine und grobe Äste, was auch zu sehr unterschiedlichen Abmessungen der daraus erzeugten Hackschnitzel führt. Zusätzlich ist zu beachten, dass eine Verdichtung des Schüttguts, zum Beispiel durch geringe durchschnittliche Partikelgrössen (weniger Luftzwischenräume) oder Einrütteln der Partikel beim Transport, das Schüttvolumen verringert.

Für die Umrechnung von Festmeter (ungehacktes Holz) in Schüttraummeter (Hackschnitzel) kann ein durchschnittlicher Auflockerungsfaktor von 2.8 herangezogen werden. Ein Vorgehen zur Bestimmung der Schüttdichte ist in der Norm EN ISO 17827 [28] beschrieben.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Bestimmung des gelieferten Volumens sehr einfach ist und praktisch keine Kosten verursacht. Allerdings ist der Bezug auf das Volumen zur Angabe von Energieinhalten oder Brennstoffpreisen nicht gut geeignet. Aufgrund schwankender Dichten, Schüttdichten und Wassergehalte des Brennstoffs sind solche Angaben sehr ungenau. Eine präzise Angabe relevanter Kenngrössen ist nur anhand der Brennstoffmasse und in Abhängigkeit des jeweiligen Bezugszustands beziehungsweise Wassergehalts möglich. Während eine Berechnung nach Volumen für eine Auslegung des Brennstofflagers und Abschätzung von Transportmengen geeignet ist, erscheint sie für die Abrechnung von Brennstofflieferungen eher ungenügend (Abschnitt 4.7).

Tabelle 4.5 Schüttdichte und Energieinhalt verschiedener Brennstoffe.

Energieträger	Wassergehalt [m.-%]	Schüttdichte [kg/Srm]	Energieinhalt [kWh/Srm]	Volumen pro Energieinhalt [m³/MWh]
Hackschnitzel (HH)[1)]	30	250 - 330	900 - 1'100	1.10 - 0.90
Hackschnitzel (WH)[1)]	30	160 - 230	600 - 800	1.70 - 1.25
Rinde (HH)	50	500	1'000	1.00
Rinde (WH)	50	320	750	1.33
Sägespäne (HH)	40	230 - 270	650 - 750	1.50 - 1.33
Sägespäne (WH)	40	150 - 190	450 - 550	2.20 - 1.80
Sägemehl	15	170	717	1.39
Hobelspäne	15	90	380	2.63
Briketts	2	900 - 1'500	4'500 - 7'500	0.17
Pellets	8 - 10	670	3'000 - 3'500	0.30
Steinkohle	-	870	8'300	0.12
Heizöl extra leicht[2)]	-	840	10'000	0.10

[1)] HH: Hartholz, WH: Weichholz; [2)] Srm entspricht m³

4.5 Brennstoffbereitstellung für automatisch beschickte Holzfeuerungen

4.5.1 Übersicht

Energieholz fällt (mit Ausnahme von Kurzumtriebskulturen) als Rückstand oder Koppelprodukt stofflicher Holznutzung oder auch bei der Waldpflege (z. B. Stangenholzdurchforstung) an. Die verschiedenen Quellen, Aufbereitungs- und Verwertungspfade sind in Bild 4.3 dargestellt. Die DIN EN ISO 17225 [23] «Biogene Festbrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen» wurde seit dem Jahr 2014 sukzessive erweitert und enthält Klassifizierungen verschiedener Holzbrennstoffe:

- Teil 1: Allgemeine Anforderungen
- Teil 2: Klassifizierung von Holzpellets
- Teil 3: Klassifizierung von Holzbriketts
- Teil 4: Klassifizierung von Holzhackschnitzeln
- Teil 5: Stückholz
- Teil 6: Klassifizierung von nicht-holzartigen Pellets
- Teil 7: Klassifizierung von nicht-holzartigen Briketts
- Teil 8: Klassifizierung von thermisch behandelten und gepressten Brennstoffen aus Biomasse (zurückgezogen)
- Teil 9: Klassifizierung von grobem Schredderholz und Holzhackschnitzeln für die industrielle Verwendung

Der Stoffffluss von Energieholz kann drei Rohstoffquellen zugeordnet werden: (1) der forstwirtschaftlichen Nutzung von Wäldern, (2) dem Holzanbau in Kurzumtriebsplantagen (KUP), (3) dem Anfall als Reststoff bei Landschaftspflegemassnahmen (LPH). Während besonders Nadelhölzer nach der Ernte einer stofflichen Nutzung zugeführt werden, fallen im Wald und bei der Holzverarbeitung verschiedene Kategorien von Energieholz an. Aus diversen Verarbeitungsschritten fallen Zwischenprodukte an, die innerhalb der holzverarbeitenden Industrie als Brennstoff eingesetzt werden, um den eigenen Energiebedarf zu decken. Neben dieser internen Nutzung wird Energieholz aus forstlicher Produktion zu Endprodukten verarbeitet und in Form von Scheitholz, Pellets sowie Hack- und Schreddergut an Endkunden geliefert.

KUP-Holz wird in der Regel direkt nach der Ernte zerkleinert und in Form von Hackgut an (Gross-)Verbraucher geliefert. Ein ähnlicher Verwertungspfad liegt bei Landschaftspflegehölzern vor, die nach Pflegemassnahmen meist auf Sammelplätzen zusammengetragen und als Schreddergut einer energetischen Verwertung zugeführt werden. Altholz wird nach dem Ausscheiden aus dem Kreislauf stofflicher Nutzung einer energetischen Verwertung in geeigneten Anlagen zugeführt (siehe Bild 4.3).

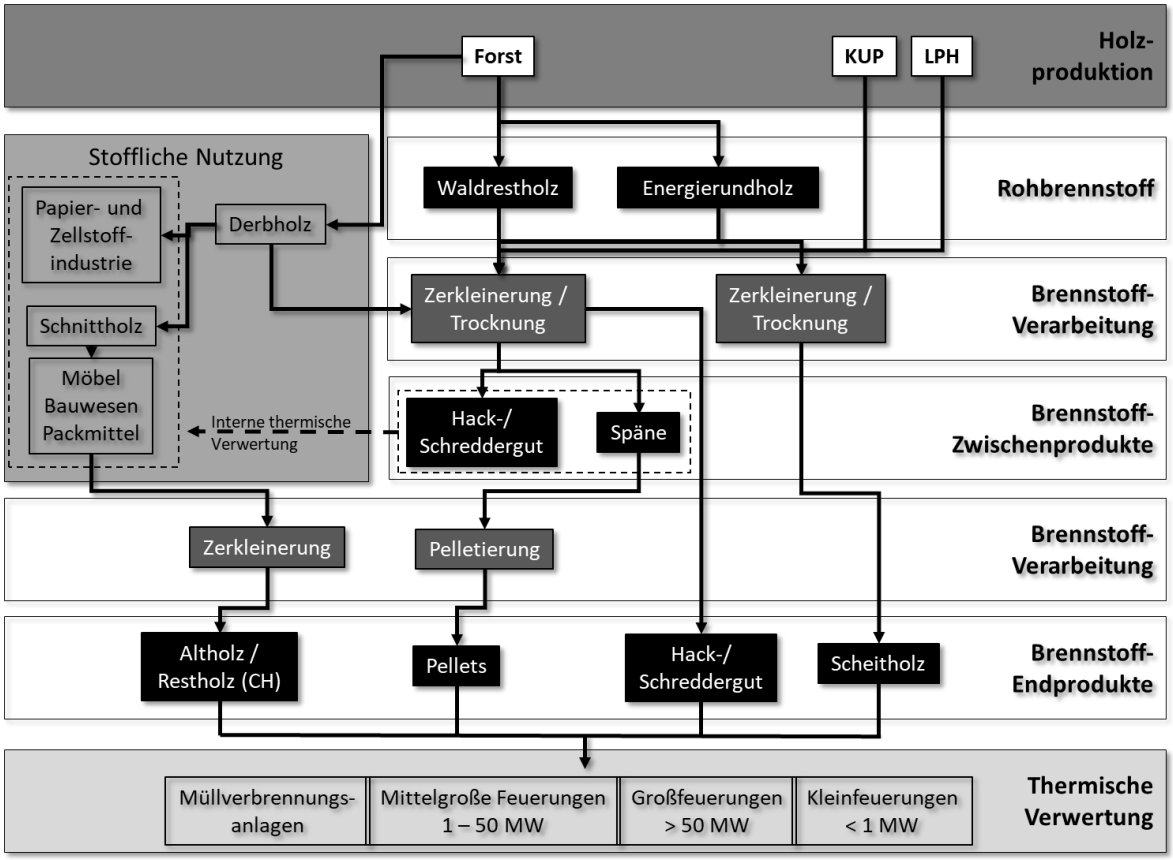


Bild 4.3 Stoffflussdiagramm Energieholz.

4.5.2 Energieholzsortimente

Waldrestholz und Energierundholz: Aus der Nutzung und Pflege von Wäldern fällt sogenanntes Waldrestholz an, das der energetischen Verwertung zugeführt wird. Dabei handelt es sich zum einen um Durchforstungsrestholz, zum anderen um Rückstände aus der Stammholzgewinnung für die stoffliche Nutzung (meist Kronenderbholz). Beide Sortimente weisen aufgrund geringer Durchmesser häufig hohe Rindenanteile und insbesondere bei der Pflege von Nadelwäldern erhöhte Nadelanteile auf und stellen so erhöhte Anforderungen an die Anlagentechnik. Bei der gezielten Entnahme schwacher Stämme als Energierundholz wird Derbholz energetisch genutzt. Meist verbleiben Baumbestandteile mit hohen Aschegehalten wie Nadeln, Zweige und Äste im Bestand, was zu einem qualitativ hochwertigen Brennstoff führt.

Brennstoff aus Kurzumtriebsplantagen (KUP): Auf Kurzumtriebsplantagen werden üblicherweise schnell wachsende Hölzer wie Pappel oder Weide mit dem Ziel der energetischen Verwertung angebaut. Die Ernte erfolgt hauptsächlich im Winter, das heisst im laubfreien Zustand. Der Wassergehalt in Hackschnitzeln aus KUP liegt tendenziell höher als die mittleren Wassergehalte erntefrischer Hackschnitzel aus Waldrestholz und Energierundholz. KUP-Hölzer weisen zudem relativ geringe Rohdichten auf; dies und der hohe Wassergehalt sollten vor allem bei volumenbasierter Abrechnung berücksichtigt werden. Der Aschegehalt von KUP-Hackschnitzeln ist aufgrund des in beiden Sortimenten im Vergleich zu Energierundholz erhöhten Gehalts an Rinde und feinen Ästen in der Regel mit demjenigen von Waldrestholz vergleichbar. Ebenso ist der Heizwert (wasserfreie Bezugsbasis) mit dem von Waldrestholz vergleichbar. Eine Verbrennung erntefrischer KUP-Hackschnitzel ist besonders in kleineren Feuerungen nicht empfehlenswert, da hier seitens der Hersteller oft der Einsatz von Brennstoffen mit niedrigeren Wassergehalten (max. 30 bis 35 %) vorgegeben ist. Der angestrebte Wassergehalt lässt sich durch (natürliche) Trocknung oder Mischung der KUP-Hackschnitzel mit trockeneren Brennstoffen erreichen [29].

Landschaftspflegeholz (LPH): Landschaftspflegeholz stammt aus der Pflege von Hecken und Böschungen an Verkehrsflächen (Strassen, Schienen und Wasserwegen), Stromtrassen sowie Grünflächen im urbanen Bereich. Die Zusammensetzung kann sehr unterschiedlich sein, beispielsweise fällt neben Weichholz (z. B. Erle,

Pappel und Weide) auch Hartholz (z. B. Ahorn, Hasel, Hainbuche) an. Im kommunalen Bereich werden Garten- und Parkabfälle sowie Strauchschnitt durch Hol- oder Bringsysteme separat erfasst. Dieser Grünabfall enthält (besonders im Sommer) einen hohen Anteil krautartiges Material, das sich für eine Verwertung durch Kompostierung oder Vergärung eignet. Für eine thermische Verwertung ist der holzreiche Anteil von Bedeutung, der vermehrt im Winter anfällt [30]. Fachliteratur weist häufig auf teilweise erhöhte Gehalte an Schadstoffen wie zum Beispiel Asche, Schwermetallen oder Chlor in Landschaftspflegeholz als Brennstoff hin, welche erhöhte Anforderungen an Genehmigungsverfahren und Anlagentechnik mit sich bringen können [31]. Wissenschaftliche Untersuchungen haben einen Einfluss durch die winterliche Salzstreuung auf Strassen oder die Düngung angrenzender landwirtschaftlich genutzter Flächen aufgezeigt. Allerdings sind die gemessenen Chlorgehalte in Landschaftspflegeholz mit denen in Waldhackschnitzeln vergleichbar. Neben dem Standort ist demnach vor allem entscheidend, welche Teile eines Baums zu Hackschnitzeln verarbeitet werden. Erhöhte Asche- und Chlorgehalte wurden besonders in feineren Ästen festgestellt, die einen hohen Rindenanteil im Vergleich zum Holz aufweisen [32].

Altholz: Stofflich genutztes Holz wird am Ende seiner Nutzungsdauer zu Altholz. Dieses Altholz stammt aus unterschiedlichen Quellen und wird im Sinne einer Kaskadennutzung verwertet. Dafür wird es gesammelt und auf geeigneten Plätzen aufbereitet. Hier erfolgt eine Aufteilung der Stoffströme hinsichtlich ihrer weiteren Verwertung: Unbelastete Althölzer, die für eine stoffliche Nutzung geeignet sind, werden als Sekundärrohstoff wiederverwendet. Übermengen oder belastete Althölzer, die sich nicht mehr für eine stoffliche Nutzung eignen, werden der energetischen Nutzung zugeführt [33]. Unter dem Begriff Altholz gesammelte Materialien zeichnen sich besonders mit Blick auf Fremdstoffanteile und Verunreinigungen durch ihre Inhomogenität aus. Die abfallrechtliche Katalogisierung von Altholz entsprechend seiner Herkunft, Zusammensetzung und Belastung mit Gefahrstoffen ermöglicht eine Einteilung in verschiedene Kategorien (Tabelle 4.6).

Tabelle 4.6 Katalogisierung von Altholz nach Europäischem Abfallverzeichnis [34] und Listen zum Verkehr mit Abfällen des Eidgenössischen Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation [35].

Abfallbezeichnung	Abfallschlüssel/Code	Beschreibung
Abfälle der Holzbearbeitung und Herstellung von Platten, Möbeln, Zellstoff, Papier und Pappe/Karton	03 01 01	Rinden- und Korkabfälle
	03 01 04*	Sägemehl, Späne, Abschnitte, Holz, Spanplatten und Furniere, die gefährliche Stoffe enthalten/Problematische Holzabfälle (CH)
	03 01 05	Sägemehl, Späne, Abschnitte, Holz, Spanplatten und Furniere, mit der Ausnahme derjenigen, die unter 03 01 04* fallen/Ausschliesslich mechanisch bearbeitetes Holz (CH)
	03 03 01	Rinden- und Holzabfälle
Verpackungsabfall	15 01 03	Verpackungen aus Holz
	15 01 10*	Verpackungen, die Rückstände gefährlicher Stoffe enthalten oder durch gefährliche Stoffe verunreinigt wurden
Bau- und Abbruchabfälle, Bodenaushub	17 02 01	Holz, anstelle dieses Codes wird in der Schweiz 17 02 97 oder 17 02 98 verwendet
	17 02 04*	Glas, Kunststoff und Holz, die gefährliche Stoffe enthalten oder durch gefährliche Stoffe verunreinigt sind/Glas oder Kunststoffe, die gefährliche Stoffe enthalten oder durch gefährliche Stoffe verunreinigt sind (CH)
	17 02 97	CH: Altholz von Baustellen, Abbrüchen, Renovationen und Umbauten
	17 02 98*	CH: Problematische Holzabfälle
Abfälle aus Abfallbehandlungsanlagen	19 12 06*	Holz, das gefährliche Stoffe enthält/Problematische Holzabfälle
	19 12 07	Holz mit Ausnahme desjenigen, das unter 19 12 06 fällt/Abfälle von naturbelassenem Holz
Siedlungsabfälle	20 01 37*	Holz, das gefährliche Stoffe enthält/Problematische Holzabfälle
	20 01 38	Holz mit Ausnahme desjenigen, das unter 20 01 37 fällt/Abfälle von naturbelassenem Holz
	20 03 07	Sperrmüll
* als gefährlich eingestufte Abfälle gemäss Europäischem Abfallverzeichnis [34]		

Tabelle 4.7 Beispielhafte Klassifizierung von Altholz in DE und CH.

Deutschland		Schweiz		
Kategorie	Beschreibung gemäss Altholzverordnung (AltholzV)	Beschrieb allgemein	Luftreinhalte-Verordnung (LRV)	
A I	Naturbelassenes oder lediglich mechanisch bearbeitetes Altholz	Naturbelassenes Waldholz	Naturbelassenes Holz (stückig und nicht stückig) Bst. a+b	Holzbrennstoffe Anhang 5, Ziffer 31, Absatz 1
		Restholz aus Sägereien	Unbehandeltes Altholz Bst. d 1	
		Restholz aus Zimmereien, Schreinereien	Unbehandeltes Altholz Bst. d 1	
A II	Verleimtes, gestrichenes, beschichtetes, lackiertes oder anderweitig behandeltes Altholz ohne halogenorganische Verbindungen in der Beschichtung und ohne Holzschutzmittel.		Restholz Bst. c	
		Behandeltes Altholz ohne Holzschutzmittel, halogenorganische Beschichtung oder PCB	Altholz Bst. a	Übrige Brennstoffe aus Holz, gelten nicht als Holzbrennstoffe Anhang 5, Ziffer 31, Absatz 2
A III	Altholz mit halogenorganischen Verbindungen in der Beschichtung ohne Holzschutzmittel.	Behandeltes Altholz mit halogenorganischer Beschichtung, ohne Holzschutzmittel	Problematische Holzabfälle Bst. b	
A IV	Mit Holzschutzmitteln behandeltes Altholz […] sowie sonstiges Altholz, das […] nicht den Kategorien A I – A III zugeordnet werden kann, ausgenommen PCB-Altholz.	Beh. Altholz mit Holzschutzmittel		
PCB-Altholz	Altholz, das PCB im Sinne der PCB/PCT-Abfallverordnung ist und nach deren Vorschriften zu entsorgen ist, insbesondere Dämm- und Schallschutzplatten, die mit Mitteln behandelt wurden, die polychlorierte Biphenyle enthalten.	Mit PCB behandelte Holzabfälle		

In Deutschland gibt es zusätzlich zur Katalogisierung nach Abfallschlüsseln/-codes die Klassifizierung in Altholzkategorien (Tabelle 4.7). In der Schweiz gilt Altholz nicht als Holzbrennstoff, sondern als Abfall gemäss Luftreinhalte-Verordnung (LRV) [36]. Altholz A I und A II gemäss Klassifizierung Altholz DE entsprechen dem nach der LRV zugelassenen Altholz, welches in Holzfeuerungen verbrannt werden darf (siehe Tabelle 4.7). Für die thermische Verwertung belasteter Sortimente (z. B. Reste von PVC-beschichteten oder druckimprägnierten Hölzern) sind länderspezifische Regularien hinsichtlich der Anlagentechnik und Emissionsschutzmassnahmen einzuhalten. Der Begriff Industrie- oder Sägerestholz bezeichnet ein Nebenprodukt aus der holzverarbeitenden Industrie, das in der Schweiz ausschliesslich in naturbelassener Form als Holzbrennstoff zugelassen ist. In Österreich ist Altholz ebenfalls als Abfall und nicht als Brennstoff klassifiziert, aber Nebenprodukte aus der holzverarbeitenden Industrie sind als Brennstoff einsetzbar. Die thermische Verwertung von Altholz erfolgt fast ausschliesslich in speziellen Altholz- oder Müllverbrennungsanlagen sowie in Industrieanlagen zur Verwertung der anfallenden biogenen Reststoffe (z. B. Papier- und Plattenindustrie). Eine Mitverbrennung von unbehandeltem Altholz in Biomasse-Nah- und -Fernwärmeanlagen ist jedoch mit entsprechender behördlicher Genehmigung möglich.

4.5.3 Brennstoffaufbereitung

Mechanische Zerkleinerung: Die mechanische Zerkleinerung kann nach zwei Grundprinzipien erfolgen (siehe Bild 4.4).

- Schneidendes Verfahren mit scharfen Werkzeugen (Trommel- oder Scheibenhacker) für die Produktion von Hackschnitzeln; die Hackschnitzel weisen ein gutes Fliessverhalten auf und bilden einen homogenen Brennstoff; eingesetzt insbesondere zur Herstellung von Waldhackschnitzeln, in Sägewerken und holzverarbeitenden Betrieben. Holzhackschnitzel nach ISO 17225-4 müssen mit schneidenden Werkzeugen hergestellt werden.
- Brechendes Verfahren mit stumpfen Werkzeugen (langsam laufende Hacker mit Reisszähnen, Hammermühlen, Schneckenhacker usw.) für die Produktion von geschreddertem Brennstoff. Geschreddertes Material verkeilt sich leicht, weist ein schlechtes Fliessverhalten auf und ist besonders inhomogen. Das Werkzeug ist weniger empfindlich gegenüber Fremdkörpern und wird daher hauptsächlich im Landschaftspflege-Bereich eingesetzt.

Trocknung und Lagerung: Die Lagerung von Brennstoffen ist ein wichtiger Teil der Bereitstellungskette. Einerseits kann durch während der Lagerung stattfindende natürliche Trocknungsprozesse eine Qualitätsverbesserung aufgrund sinkender Wassergehalte erzielt werden. Andererseits spielt die Lagerhaltung eine grosse Rolle als Mengenpuffer

zur bedarfsgerechten Brennstoffbereitstellung. Grundsätzlich bieten sich verschiedene Möglichkeiten an: Lagerung vor oder nach dem Hacken, natürliche oder technische Trocknung, Lagerung im Freien oder in Hallen. Die Einsatzmöglichkeiten sowie Vor- und Nachteile der jeweiligen Methoden werden im Folgenden beschrieben [37].



Bild 4.4 Unterscheidung zwischen Hackschnitzeln (geschnitten mit scharfen Werkzeugen, links) und Schredderholz (zerkleinert mit stumpfen Werkzeugen, rechts).

Das zu hackende Holz kann nach der Ernte in Form von Poltern einige Wochen bis Monate auf einem geeigneten Lagerplatz liegen bleiben. Dadurch wird eine Vortrocknung auf Wassergehalte < 50 % bis < 30 % erreicht. Ein idealer Lagerplatz zum Vortrocknen sollte gut durchlüftet und besonnt sein, waldnah liegen, einen trockenen, durchlässigen Untergrund aufweisen sowie ganzjährig anfahrbar sein.

Die natürliche Trocknung von Hackschnitzelhaufen erfolgt durch Konvektion. Durch Selbsterwärmung im Haufen entsteht ein Temperaturunterschied zur Umgebung. Dadurch steigt warme Luft aus der Schüttung auf und transportiert die Feuchtigkeit ab, kühlere und trockenere Luft strömt seitlich nach. Grösse und Form der Hackschnitzel-Miete spielen eine wichtige Rolle. Die Form sollte dachprofilartig («Spitzkegel») sein. Dies begünstigt die Konvektion (Kaminzugeffekt) und Niederschlagswasser kann sich nicht in Mulden an der Mietenoberfläche ansammeln. Zusätzlich bietet die Abdeckung mit einem diffusionsoffenen Vlies Schutz vor Niederschlag, lässt aber Verdunstung von innen zu. Die Mietenhöhe sollte vier Meter nicht übersteigen, um das Brandrisiko durch Selbstentzündung zu vermeiden. Eine technische Trocknung dagegen erfolgt deutlich schneller, ist jedoch kostenintensiver. Zur Trocknung kann die Abwärme von Kraftwerken wie zum Beispiel Biogas-BHKWs oder eine solare Trocknung mit Luftkollektoren [38] eingesetzt werden.

Häufig werden Hackschnitzel aus erntefrischem Holzmaterial mit einem hohen Wassergehalt > 50 % hergestellt und vor der Nutzung für längere Zeit in einem überdachten oder nicht überdachten Zwischenlager oder bei der Heizungsanlage gelagert. Bei der Lagerung von frischem Hackgut mit einem hohen Wassergehalt können verschiedene Probleme auftreten:

- Biologische Prozesse erhitzen den Hackschnitzelhaufen, Entzündung ist möglich.
- Wasser kondensiert an Schüttungskrone, gesundheitsschädlicher Schimmel entsteht.
- Abbauprozesse und holzzersetzende Pilze reduzieren organische Substanz (abnehmende Dichte und Zunahme des Aschegehalts); es kann zu einer Verschlechterung von Brennstoffparametern kommen (z. B. Anreicherung von Stickstoff).

Diese Gefahren lassen sich durch eine rasche Trocknung des Materials auf Wassergehalte < 30 % sowie geeignete Lagerbedingungen reduzieren. Ideal ist grobes und scharfkantiges Hackgut mit geringem Feinanteil. Dies bietet genügend Zwischenräume für Luftzirkulation und Feuchteabfuhr. Die Lagerdauer sollte nicht zu lang sein, ein Richtwert sind drei Monate. Bei Einlagerung und Verwendung sollte eine entsprechende Reihenfolge eingehalten werden (Prinzip «first in – first out»).

Für die Lagerung im Freien ist auf einen trockenen Untergrund sowie eine möglichst sonnige und windexponierte Lage zu achten. Ein befestigter Untergrund lässt sich gegenüber einem unbefestigten Untergrund ganzjährig mit Schwerlastfahrzeugen befahren. Bewährt haben sich geschotterte Plätze, die Flächen zwar befestigen, aber nicht versiegeln. Im Vergleich zu geteerten Flächen besteht hier und auf unbefestigten Plätzen jedoch die Möglichkeit, dass der Brennstoff durch Anhaftungen von Mineralboden oder Humus und Steinen verunreinigt wird. Bei der Lagerung in Gebäuden wie Hackschnitzelbunkern oder Hallen ist der Brennstoff vor Niederschlag geschützt. Es muss eine gute Luftzirkulation gewährleistet sein, um Kondensationswasser- und daraus resultierender Schimmelbildung entgegenzuwirken.

Pressung/Pelletierung: Durch Pressung von trockenen naturbelassenen Säge- oder Hobelspänen mit oder ohne Zugabe von Additiven entsteht der Festbrennstoff Holzpellets. Die DIN EN ISO 17225-2 enthält Anforderungen an Rohmaterial und Pelleteigenschaften (Durchmesser und Länge, Wassergehalt, Aschegehalt und -schmelzverhalten, mechanische Festigkeit, Feingutanteil, Additive, Heizwert, Schüttdichte, Elementgehalte), gegliedert nach Verwendung im gewerblichen und häuslichen (A1, A2, B) und im industriellen Bereich (I1, I2, I3).

Obwohl es sich bei Pellets um einen sehr trockenen Brennstoff handelt, finden während der Lagerung Prozesse statt, die zur sogenannten Ausgasung und einer Selbsterwärmung des Brennstoffs führen. Im Holz enthaltene Extraktstoffe (Harze, Fette und freie Fettsäuren) gelangen durch hohe Temperaturen bei der Trocknung oder durch Druckeinwirkung beim Pelletieren an die Brennstoffoberfläche und kommen so in Kontakt mit Luftsauerstoff. Dadurch werden Oxidationsreaktionen in Gang gesetzt, die zur Freisetzung von flüchtigen organischen Kohlenwasserstoffen (VOC), Kohlenstoffmonoxid (CO) und Kohlenstoffdioxid (CO_2) führen. Die entstehenden organischen Verbindungen wie beispielsweise Buttersäure und Aldehyde können Geruchsbelästigungen verursachen. Die geruchslosen Gase CO und CO_2 können in nicht ausreichend belüfteten Lagerräumen zu Sauerstoffmangel führen, für das Personal besteht Erstickungs- und Vergiftungsgefahr. In Verbindung mit einer Selbsterwärmung des Brennstoffs (sowohl durch exotherme Oxidationsreaktionen als auch durch Adsorptionswärme, die entsteht, wenn Pellets Feuchtigkeit aus der Luft aufnehmen) kann die Anwesenheit von brennbaren Gasen wie CO besonders in sehr grossen Lagern zu einer Selbstentzündung führen. Pelletlager sollten daher immer ausreichend belüftet sein (siehe Kapitel

14.2.9 und 19). Die Ausgasung nimmt mit zunehmendem Brennstoffalter und mit der Lagerdauer ab. Weitere Einflussgrössen sind die mechanische Belastung während der Befüllung des Lagers (möglichst kurze Wege, um den Abrieb von Feinmaterial zu verhindern) und die Temperatur bei der Lagerung (je geringer, desto niedriger die Aktivität) [39].

4.5.4 Qualitätsparameter

Holzbrennstoffe zeigen grosse Qualitätsunterschiede aufgrund von verschiedenen Ausgangsmaterialien und Unterschieden im Herstellungsprozess. Ein emissionsarmer, störungsfreier und energieeffizienter Betrieb von Holzfeuerungen ist nur mit dem Einsatz eines geeigneten, auf die Anlage abgestimmten Brennstoffs möglich (Kapitel 5 und 13). Beispielsweise benötigen besonders Kleinfeuerungsanlagen (Standard-Seriengeräte) gleichbleibend homogene Qualitäten mit niedrigem Wassergehalt, Aschegehalt und Feinanteil. Auch mit Blick auf die Abrechnung ist eine genaue Beurteilung der Brennstoffqualität essenziell. Tabelle 4.8 gibt einen Überblick über wesentliche Qualitätsparameter, anhand derer sich Brennstoffe «auf den ersten Blick» einschätzen lassen.

Tabelle 4.8 Typische Merkmale zur Bewertung der Brennstoffqualität.

Qualitäts-parameter	«Gute» Qualität	«Schlechte» Qualität
Wassergehalt	niedrig	hoch
Aschegehalt	niedrig	hoch
Heizwert	hoch	niedrig
Partikelform	scharfkantig	rau
Feinanteil	niedrig	hoch
Überlängen	niedrig	hoch
Störstoffgehalt	niedrig	hoch

Tabelle 4.9 enthält typische Wertebereiche wichtiger Brennstoffparameter für Holz und Rinde von Laub- und Nadelbäumen sowie für Altholz. Die Baumarten Weide und Pappel stehen exemplarisch für Holz aus dem Kurzumtrieb oder Landschaftspflegeholz (KUP und LPH). Es ist zu beachten, dass die aufgeführten Werte grosse Schwankungsbereiche abdecken. Der typische Wert ist ein statistisch ermittelter Anhaltspunkt. Die tatsächliche Brennstoffzusammensetzung kann davon abweichen und ist zum Beispiel abhängig vom jeweiligen Standort. Planerinnen und Planer, Lieferanten und Anlagenbetriebsgesellschaft müssen daher für eine Auslegung individuelle Werte festlegen. Online-Datenbanken wie Phyllis2 [40] oder FRED des Bayerischen Landesamtes für Umwelt [41] enthalten zusätzliche Daten zu verschiedenen Brennstoffen.

Tabelle 4.9 Typische Brennstoffparameter von Holz und Rinde – Teil I Hauptelemente [23], [33], [42].

Parameter	Einheit (Bezugszustand: wf)		Holz (ohne Rinde, Blätter, Nadeln)		Rinde		KUP und LPH		Altholz
			Nadelholz	Laubholz	Nadelholz	Laubholz	Weide	Pappel	
Asche-gehalt	m.-%	Wertebereich	0.1 - 1.0	0.2 - 1.0	< 1 - 5	0.8 - 3.0	1.1 - 4.0	1.5 - 3.4	0 - 2
		Typischer Wert	0.3	0.3	1.5	1.5	2.0	2.0	
Heizwert	MJ/kg	Wertebereich	18.5 - 19.8	18.4 - 19.2	17.5 - 20.5	17.1 - 21.3	17.7 - 19.0	18.1 - 18.8	18 - 20.2
		Typischer Wert	19.1	18.9	19.2	19	18.4	18.4	
Kohlenstoff C	m.-%	Wertebereich	47 - 54	48 - 52	48 - 55	47 - 55	46 - 49	46 - 50	n.a.
		Typischer Wert	51	49	52	52	48	48	
Wasser-stoff H	m.-%	Wertebereich	5.6 - 7.0	5.9 - 6.5	5.5 - 6.4	5.3 - 6.4	5.7 - 6.4	5.7 - 6.5	n.a.
		Typischer Wert	6.3	6.2	5.9	5.8	6.1	6.2	
Sauerstoff O	m.-%	Wertebereich	40 - 44	41 - 45	34 - 42	32 - 42	40 - 44	39 - 45	n.a.
		Typischer Wert	42	44	38	38	43	43	
Stickstoff N	m.-%	Wertebereich	< 0.1 - 0.5	< 0.1 - 0.5	0.3 - 0.9	0.1 - 0.8	0.2 - 0.8	0.2 - 0.6	n.a.
		Typischer Wert	0.1[1)]	0.2[1)]	0.5	0.3	0.5	0.4	
Schwefel S	m.-%	Wertebereich	< 0.01 - 0.02	< 0.01 - 0.05	< 0.02 - 0.05	< 0.02 - 0.20	0.02 - 0.10	0.02 - 0.10	n.a.
		Typischer Wert	< 0.02	0.02	0.03	0.03	0.05	0.03	
Chlor Cl	m.-%	Wertebereich	< 0.01 - 0.03	< 0.01 - 0.03	< 0.01 - 0.05	< 0.01 - 0.05	0.01 - 0.05	< 0.01 - 0.05	0.02 - 0.20
		Typischer Wert	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	< 0.01	
Fluor F	m.-%	Wertebereich	< 0.0005	< 0.0005	< 0.0005 - 0.002	n.a.	0 - 0.01	n.a.	n.a.
		Typischer Wert	< 0.0005	< 0.0005	0.001		0.003		
Aluminium Al	mg/kg	Wertebereich	30 - 400	< 10 - 50	400 - 1'200	30 - 100	3 - 100	n.a.	n.a.
		Typischer Wert	100	20	800	50	50	10	
Calcium Ca	mg/kg	Wertebereich	500 - 1'000	800 - 20'000	1'000 - 15'000	10'000 - 20'000	2'000 - 9'000	4'000 - 6'000	n.a.
		Typischer Wert	900	1'200	5'000	15'000	5'000	5'000	
Eisen Fe	mg/kg	Wertebereich	10 - 100	10 - 100	100 - 800	50 - 200	30 - 600	n.a.	n.a.
		Typischer Wert	25	25	500	100	100	30	
Kalium K	mg/kg	Wertebereich	200 - 500	500 - 1'500	1'000 - 3'000	1'000 - 3'200	1'700 - 4'000	2'000 - 4'000	n.a.
		Typischer Wert	400	800	2'000	2'000	2'500	2'500	
Magnesium Mg	mg/kg	Wertebereich	100 - 200	100 - 400	400 - 1'500	400 - 1'000	200 - 800	200 - 800	n.a.
		Typischer Wert	150	200	1'000	500	500	500	
Mangan Mn	mg/kg	Wertebereich	40 - 200	n.a.	9 - 840	n.a.	79 - 160	n.a.	n.a.
		Typischer Wert	100		500	190	97	20	
Natrium Na	mg/kg	Wertebereich	10 - 50	10 - 200	70 - 2'000	20 - 1'000	10 - 450	10 - 60	n.a.
		Typischer Wert	20	50	300	100	n.a.	25	
Phosphor P	mg/kg	Wertebereich	50 - 100	50 - 200	20 - 600	300 - 700	500 - 1'300	800 - 1'100	n.a.
		Typischer Wert	60	100	400	400	800	1'000	
Silicium Si	mg/kg	Wertebereich	100 - 200	100 - 200	500 - 5'000	2'000 - 20'000	2 - 2'000	n.a.	n.a.
		Typischer Wert	150	150	2'000	2'500	500		
Arsen As	mg/kg	Wertebereich	< 0.1 - 1.0	< 0.1 - 1.0	0.1 - 4.0	0.1 - 4	< 0.1	< 0.1 - 0.2	0.39 - 15.4
		Typischer Wert	< 0.1	< 0.1	1.0	0.4	< 0.1	< 0.1	
Cadmium Cd	mg/kg	Wertebereich	< 0.05 - 0.50	< 0.05 - 0.50	0.2 - 1.0	0.2 - 1.2	0.2 - 5	0.2 - 1	n.a.
		Typischer Wert	0.1	0.10	0.5	0.5	2	0.5	
Chrom Cr	mg/kg	Wertebereich	0.2 - 10.0	0.2 - 10.0	1 - 10	1 - 30	0.3 - 5	0.3 - 2	0.1 - 5.3
		Typischer Wert	1.0	1.0	5	5	1	1	
Kupfer Cu	mg/kg	Wertebereich	0.5 - 10.0	0.5 - 10.0	3 - 30	2 - 20	2 - 4	2 - 4	3.4 - 668.4
		Typischer Wert	2.0	2.0	5	5	3	3	
Quecksil-ber Hg	mg/kg	Wertebereich	< 0.02 - 0.05	< 0.02 - 0.05	0.01 - 0.1	n.a.	< 0.03	< 0.03	0.02 - 36.1
		Typischer Wert	0.02	0.02	0.05	< 0.05	< 0.03	< 0.03	
Nickel Ni	mg/kg	Wertebereich	< 0.1 - 10.0	< 0.1 - 10.0	2 - 20	2 - 10	0.2 - 2	0.2 - 1.0	n.a.
		Typischer Wert	0.5	0.5	10	10	0.5	0.5	
Blei Pb	mg/kg	Wertebereich	< 0.5 - 10.0	< 0.5 - 10.0	1 - 30	2 - 30	0.1 - 0.2	0.1 - 0.3	9.3 - 3'314.3
		Typischer Wert	2.0	2.0	4	15	0.1	0.1	
Vanadium V	mg/kg	Wertebereich	< 2	< 2	0.7 - 2.0	1 - 4	0.2 - 0.6	n.a.	n.a.
		Typischer Wert	< 2	< 2	1.0	2	0.3		
Zink Zn	mg/kg	Wertebereich	5 - 50	5 - 100	70 - 200	7 - 200	40 - 100	30 - 100	n.a.
		Typischer Wert	10	10	100	50	70	50	

[1)] Der typische Stickstoffgehalt variiert je nach Holzart: Fichte 0.1, Weisstanne 0.17, Buche 0.22 [43]. n.a. = nicht verfügbar.

Der **Wassergehalt** ist der wichtigste Parameter in Bezug auf die Brennstoffqualität. Der Wassergehalt ist ein wesentlicher Faktor für die Lagerfähigkeit und -beständigkeit des fertig aufbereiteten Brennstoffs und die Notwendigkeit einer Trocknung (Ziel Wassergehalt < 30 – 35 %) oder allenfalls einer Vermischung. Er beeinflusst direkt den Heizwert, da das im Brennstoff enthaltene Wasser bei der Verbrennung unter Einsatz von Wärmeenergie zunächst verdampft werden muss. Ohne Brennwerttechnik kann diese Wärmeenergie nicht durch Kondensation des Dampfes zurückgewonnen werden. Des Weiteren hat der Wassergehalt einen Einfluss auf die bei der Verbrennung freigesetzten Emissionen an CO und Staub sowie den Anfall von Asche. Die Masse des Wassers selbst und Schrumpfungseffekte bei der Trocknung beeinflussen die Schüttdichte des Brennstoffs.

Der typische Wassergehalt erntefrischer Rundhölzer (Kern- und Splintholzbereich) sowie frischer Waldhackschnitzel liegt bei 45 bis 55 %, bei Material aus KUP häufig auch > 55 %. Durch technische oder natürliche Trocknung lassen sich deutlich niedrigere Wassergehalte von 15 - 35 % erreichen. Hackschnitzel mit Wassergehalt < 15 % können in der Regel nur mittels technischer Trocknung erzeugt werden. Ein besonders trockener Brennstoff sind dagegen Holzpellets, die nach Norm einen Wassergehalt < 10 % aufweisen. Je nach eingesetzter Feuerungstechnik dürfen bestimmte Wassergehalte im Brennstoff nicht überschritten werden (Kapitel 5). Für Kessel im kleinen bis mittleren Leistungsbereich werden von den Herstellern und der Gesetzgebung relativ hohe Ansprüche an den Brennstoff gestellt, und es müssen die entsprechend der Typenprüfung definierten Wassergehaltsbereiche eingehalten werden (z. B. für Kleinstgeräte/Pelletöfen < 15 bis 20 %, für Seriengeräte < 35 %). Bei grösseren Heiz(kraft)werken ist auch mit Wassergehalten > 35 % bis hin zu frisch gehacktem Holz ein zuverlässiger Betrieb möglich ([37], [44]).

Der **Aschegehalt** eines Brennstoffs hat Einfluss auf Partikelemissionen und Schlackenbildung bei der Verbrennung sowie den Entsorgungsaufwand für die insgesamt anfallende Aschemenge im Anlagenbetrieb. Hohe Aschegehalte begünstigen Verschleiss und Korrosion der Anlagenteile. Abhängig von ihrer chemischen Zusammensetzung wird Asche beispielsweise als Düngemittelbestandteil oder als Zuschlagstoff bei der Zementherstellung stofflich verwertet. Kommt (z. B. aufgrund zu hoher Belastung mit Schwermetallen) kein stofflicher Verwertungspfad in Frage, muss die Asche auf geeigneten Deponien entsorgt werden [44].

Wie in Tabelle 4.9 dargestellt, schwanken die Aschegehalte je nach Holzart und Rindenanteil zwischen 0.1 und 5 %. Die DIN EN ISO 17225-4 definiert vier Klassen für Holzhackschnitzel (A1 bis B2) mit zulässigen Aschegehalten von < 1 % bis zu < 3 %. Höhere Aschegehalte sind dabei meist auf höhere Anteile an Rinde und Nadeln zurückzuführen. Je geringer etwa der Durchmesser eines Baumes oder je höher der Anteil an Zweigen ist, desto grösser ist das Verhältnis von Rinde zu Holz. Eine weitere Einflussgrösse ist aber auch die Kontamination mit anorganischen Materialien (z. B. Erde oder Steine).

Typische **Heizwerte** für Rinde oder Holz (wasserfreie Bezugsbasis) liegen zwischen 17.1 und 21.3 MJ/kg (Tabelle 4.9), wobei die Rinde einen wesentlich grösseren Schwankungsbereich abdeckt. Der Heizwert von Nadelhölzern ist bedingt durch geringfügig höhere C-Gehalte tendenziell höher als der von Laubhölzern. Dieser Aspekt ist allerdings im Vergleich zu den anderen Parametern von nachrangiger Bedeutung. Aufgrund der erhöhten Konzentrationen von aschebildenden Neben- und Spurenelementen ist der Aschegehalt von Rinde meist deutlich höher als im dazugehörigen Holz. Daraus folgt, dass der Heizwert von Rinde sowohl über als auch unter dem Heizwert des entsprechenden Holzes liegen kann [21]. Sehr hohe Aschegehalte, beispielsweise bedingt durch mineralische Verunreinigungen oder Ligninabbau durch spezielle Pilze, reduzieren den Heizwert [44].

Die **Partikelgrösse** beeinflusst massgeblich die Fliesseigenschaften sowie das Lager- und Trocknungsverhalten des Brennstoffs. Die Partikelgrösse wird massgeblich durch die Produktions- und Aufbereitungsschritte beeinflusst, ist aber auch von der Holzart und dem gewählten Sortiment abhängig. Kleine Partikel beziehungsweise ein hoher Anteil an Feinmaterial können die Durchlüftung einschränken und zu Staubemissionen bei der Bunkerbefüllung führen. Zusätzlich hat ein hoher Feinanteil negativen Einfluss auf die Verbrennungsqualität. Die gleichmässige Luftzufuhr im Brennstoffbett wird behindert, womit sich Hotspots bilden. Dies führt zu einem erhöhten Verschleiss im Rostbereich und der Schamottierung sowie einem erhöhten Staubgehalt durch Spurenstoffe im Abgas, die nicht mehr in die Asche eingebunden werden. Grosse, überlange oder fransige (= nicht scharfkantige) Partikel begünstigen Blockaden in Fördersystemen wie etwa Transportschnecken und können Brückenbildung im Lager verursachen. Hochwertige Hackschnitzel weisen eine insgesamt relativ homogene Hauptfraktion, einen geringen Feinanteil, eine geringe maximale Länge und scharfen Schnittkanten auf [37].

Der Fremdanteil ist der prozentuale Anteil an Fremdmaterial im Brennstoff. Neben Metallteilen, Steinen und Müll (grober Fremdanteil) zählen insbesondere anhaftender Humus und Mineralboden (feiner Fremdanteil) zu dieser Kategorie. Wird der grobe Fremdanteil unbeabsichtigt mitgehackt, können der Hacker selbst, Komponenten des Fördersystems oder des Heizsystems durch die Fremdstoffe zum Teil erheblich beschädigt werden. Anhaftende Erde führt zu erhöhtem Verschleiss an den Hackermessern und erhöht den Aschegehalt. Bei der Verbrennung im Heiz(kraft)werk führen ein durch Fremdstoffe erhöhter Aschegehalt, verändertes Ascheschmelzverhalten sowie gegebenenfalls erhöhter Schwermetallgehalt des Brennstoffs bzw. der Asche zu erhöhtem Entsorgungsaufwand, Korrosion und Verschlackung der Anlagenkomponenten [44].

Um die unterschiedliche Zusammensetzung von Brennstoffen und die daraus resultierenden verbrennungstechnischen Eigenschaften bei der Auswahl von Feuerungs- und Abgastechnik bestmöglich berücksichtigen zu können, hat QM Holzheizwerke eine Brennstoffklassifizierung erarbeitet (siehe Tabelle 4.10 und Tabelle 4.11).

Tabelle 4.10 Teil I – Klassifizierung von Brennstoffen und Partikelgrössen von QM Holzheizwerke basierend auf den Spezifikationen gemäss EN ISO 17225-1, die Klassifizierung von Partikelgrössen wurde ergänzt mit den S-Klassen von EN ISO 17225-4.

Brennstoffe	**Kurzbezeichnung**	**Partikelgrösse** mm (siehe Tabelle 4.11) **P**	**Wassergehalt** m.-% im Anlieferungszustand **M**	**Stickstoffgehalt** m.-% auf wasserfreier Bezugsbasis **N**[11]	**Feingutanteil < 3.15 mm** m.-% im Anlieferungszustand **F**	**Aschegehalt mit Fremdanteil** m.-% auf wasserfreier Bezugsbasis **A**	**Energieinhalt** Bezüglich $H_{u\,feucht}$ Schwankungsbereich kWh/Srm
Qualitäts-Hackschnitzel aus Waldrest(rund)holz (WS)[1) 9)] und Industrierestholz (IS)[1) 9)]	fein WS-P16S-M20 IS-P16S-M20	16S	15 - 20	0.1 - 0.5 (0.2)	F05	A1.0	WH: 700 - 900 HH: 1'000 - 1'200
	grob WS-P31S-M20 IS-P31S-M20	31S	15 - 20	0.1 - 0.5 (0.2)	F05	A1.0	WH: 630 - 850 HH: 950 - 1'150
Hackschnitzel aus Waldrestholz (WS)[1)] und Industrierestholz (IS)[1) 2)]	WS-P31S-M35 IS-P31S-M35	31S	20 - 35	0.1 - 0.5 (0.2)	F10	A3.0	WH: 600 - 800 HH: 900 - 1'100
	WS-P31S-M50 IS-P31S-M50	31S	30 - 50	0.1 - 0.5 (0.2)	F10	A3.0	WH: 550 - 750 HH: 850 - 1'050
	WS-P31S-M55+ IS-P31S-M55+	31S	30 - 60	0.1 - 0.5 (0.2)	F10	A3.0	WH: 500 - 700 HH: 800 - 1'000
	WS-P45S-M35 IS-P45S-M35	45S	20 - 35	0.1 - 0.5 (0.2)	F10	A3.0	WH: 550 - 750 HH: 850 - 1'050
	WS-P45S-M50 IS-P45S-M50	45S	30 - 50	0.1 - 0.5 (0.2)	F10	A3.0	WH: 500 - 700 HH: 800 - 1'000
	WS-P45S-M55+ IS-P45S-M55+	45S	30 - 60	0.1 - 0.5 (0.2)	F10	A3.0	WH: 450 - 650 HH: 750 - 950
	WS-P63-M50 IS-P63-M50	63	30 - 50	0.1 - 0.5 (0.2)	F10	A3.0	WH: 450 - 650 HH: 750 - 950
	WS-P63-M55+ IS-P63-M55+	63	30 - 60	0.1 - 0.5 (0.2)	F10	A3.0	WH: 400 - 600 HH: 700 - 900
Pappel und Weide aus Wald und Landschaft	PWW	31S 45S 63	30 - 60	0.2 - 0.8 (0.3)	F10 F10 F10	A5.0	450 - 700 400 - 650 350 - 600
Pappel und Weide aus Kurzumtriebsflächen	PWK	31 45 63	30 - 60	0.5 - 3.0 (0.5)	F25	A10.0	400 - 650 350 - 575 300 - 500
Holz aus Landschaftspflege	LH[1)]	31 45 63	30 - 60	0.4 - 1.0 (0.5)	F25	A10.0	400 - 800 350 - 750 300 - 700
Durchforstungsrestholz von Nadel- und Laubbäumen Ø < 80 mm und Kronenholz	DH	31 31 45 45 63 63	30 - 60	0.4 - 1.0 (0.6)	F25	A10.0	WH: 400 - 650 HH: 650 - 900 WH: 350 - 600 HH: 600 - 850 WH: 300 - 550 HH: 550 - 800
Sägespäne	SP	< 4	35 - 50	0.1 - 0.3 (0.1)	-	A3.0	WH: 450 - 550 HH: 650 - 750
Rinde zerkleinert[8)] max. Grobanteil 5 %	Rz	45 45 63 63	30 - 65+	0.3 - 0.9 (0.5)	F05 F05 F05 F05	A10.0	WH: 700 - 850 HH: 950 - 1'150 WH: 650 - 800 HH: 900 - 1'100
Rinde unzerkleinert[8)]	Ruz	n.V.	30 - 65+	0.3 - 0.9 (0.5)	F05	A10.0	-
Restholz aus der Holzverarbeitung[10)]	RHH	n.V.	n.V.	n.V.	n.V.	n.V.	-
Altholz[4) 10)]	AH	45 63	< 30	0.5 - 1.5 (0.8)[12)]	F10 F10	A10.0	550 - 750 500 - 700
Pellets[5)]	PEL	n.V.	-	-	-	-	-

Tabelle 4.11 Teil II – Klassifizierung von Brennstoffen und Partikelgrössen von QM Holzheizwerke basierend auf den Spezifikationen gemäss EN ISO 17225-1, die Klassifizierung von Partikelgrössen wurde ergänzt mit den S-Klassen von EN ISO 17225-4.

Die Klassifizierung basiert soweit möglich auf der Brennstoffnorm ISO 17225, Abweichungen sind erwähnt.

1) Darf, soweit nicht vertraglich vereinbart, keine Pappel und Weide enthalten; Rindenanteil anhaftend an den Hackschnitzeln maximal 20 m.-% wasserfrei
2) Gemäss CEN/TS 14588. Holzhackschnitzel, die als Nebenprodukt der holzverarbeitenden Industrie hergestellt werden, mit oder ohne Rinde. Als Hackschnitzel aus Industrierestholz (IS) gelten in der Schweiz nur naturbelassene Hackschnitzel aus Sägerestholz.
3) Wassergehaltsklassifizierung entspricht nicht der Brennstoffnorm ISO 17225.
4) DE: Altholzkategorie A I und A II; AT: Altholz Branchenkonzept Holz Q3 und Q4; CH: Altholz gilt nicht als Holzbrennstoff (Luftreinhalte-Verordnung: Anhang 5, Ziffer 31, Absatz 2, Buchstabe a)
5) Pelletnormen nach ISO 17225-2 beachten
6) Schwankungsbereich wird durch unterschiedliche Schüttdichte bestimmt:
   - Hacken von Stammholz ab Polter ergibt eine höhere Schüttdichte als das Hacken von ganzen Bäumen mit Ästen
   - Die Grössenverteilung der Hackschnitzel im Hauptanteil von 60 % beeinflusst die Schüttdichte (ein höherer Anteil an feinen Hackschnitzeln erhöht die Schüttdichte)
   - Das Brennstoffaufbereitungsverfahren Hacken oder Schreddern hat einen grossen Einfluss auf die Schüttdichte (geschredderter Brennstoff weist eine niedrigere Schüttdichte auf als gehackter Brennstoff)
7) mit Nadeln, Blättern und Zweigen
8) Die numerischen Werte (P-Klasse) der Masse beziehen sich auf die Partikelgrössen (Massenanteil mindestens 95 %), die durch die angegebenen Sieböffnungsgrössen von runden Öffnungen (ISO 17827-1) passen. Wenn eine Probe die Kriterien von mehr als einer Klasse erfüllt, ist sie der niedrigsten möglichen Klasse zuzuordnen. Der Grobanteil beträgt ≤ 5 m.-% im Anlieferungszustand.
9) Für Qualitäts-Hackschnitzel (grob und fein) müssen zusätzlich verschärfte Anforderungen der länderspezifischen Normen beachtet werden.
10) Bei Restholz aus der Holzverarbeitung RHH und Altholz AH ist die chemische Zusammensetzung auf Basis von Brennstoffanalysen festzulegen gemäss EN ISO 17225-1 Tabelle 5b, Seite 24 und Anhang B, Tabelle B.1, Seite 43. Bei Altholz ist zusätzlich zum maximalen Ascheanteil auch der maximale Fremdanteil (m.-% auf wasserfreier Basis) aus Sand, Steinen und Glas festzuhalten.
11) Beim Stickstoffgehalt wird ein Wertebereich und in Klammer ein typischer Wert angegeben. Für die Auslegung der Entstickung ist der typische Wert von Bedeutung.
12) Der Stickstoffgehalt bei Altholz ist abhängig von der Zusammensetzung (Anteil naturbelassenes Altholz und Plattenwerkstoff [MDF, Spanplatten, Sperrholz usw.]). Bei Plattenwerkstoff rein ist mit einem Stickstoffgehalt von maximal 6 % zu rechnen.

n.V.: nach Vereinbarung, wird fallweise festgelegt
WH: Weichholz (Nadelholz: Fichte, Tanne, Kiefer, Douglasie, Lärche; Weichlaubholz: Ahorn, Kirsche, Erle)
HH: Hartholz (Hartlaubholz: Eiche, Buche, Ulme, Edelkastanie, Esche, Robinie, Hainbuche (Hagebuche), Hasel, Birke, Nuss, Obstbäume [ausser Kirsche])
Für alle Brennstoffe gilt: H_u > 1.5 kWh/kg_{feucht}

Klassifizierung der Partikelgrössen von Holzhackschnitzeln und grobem Schredderholz					
Partikelgrösse	**Hauptanteil*** min. 60 %/95 %[1)]	**Feingutanteil*** < 3.15 mm	**Grobanteil***	**Maximallänge der Partikel**	**Querschnitt der übergrossen Partikel**
P16S	3.15 mm - 16 mm	F15	> 31.5 mm, ≤ 6 %	≤ 45 mm	< 2 cm²
P31S	3.15 mm - 31.5 mm	F10	> 45 mm, ≤ 6 %	≤ 120 mm	< 4 cm²
P31	3.15 mm - 31.5 mm	F25[2)]	> 45 mm, ≤ 6 %	≤ 200 mm	< 4 cm² [4)]
P45S	3.15 mm - 45 mm	F10	> 63 mm, ≤ 10 %	≤ 200 mm	< 6 cm²
P45	3.15 mm - 45 mm	F25[2)]	> 63 mm, ≤ 10 %	≤ 350 mm	< 6 cm² [4)]
P63	3.15 mm - 63 mm	[3)]	> 100 mm, ≤ 10 %	≤ 350 mm	< 8 cm² [4)]
P100	3.15 mm - 100 mm	[3)]	> 150 mm, ≤ 10 %	≤ 350 mm	< 12 cm² [4)]

1) Die numerischen Werte der Masse sind auf die Partikelgrössen (Massenanteil mindestens 60 %) bezogen, die durch die angegebene Sieböffnungsgrösse von runden Öffnungen (ISO 17827-1) passen. Bei Rinde und Rinde zerkleinert hat der Hauptanteil inklusive Feingutanteil einen Massenanteil von 95 % aufzuweisen. Für Holzhackschnitzel und grobes Schredderholz für die Verwendung in häuslichen und kleinen gewerblichen Feuerstätten sind S-Klassen zu verwenden. Die niedrigste mögliche Eigenschaftsklasse ist anzugeben.
2) mit Nadeln, Blättern und Zweigen
3) Feingutanteil unterschiedlich je nach Brennstoff
4) Empfehlung in Abweichung zur Norm: Für Brennstofftransport- und Brennstoffbeschickungssystem mit Förderschnecken

* Partikelgrösse in m.-% im Anlieferungszustand

4.5.5 Versorgungsstrategien

Die einzelnen Bearbeitungsschritte zur Bereitstellung von Energieholz umfassen die Holzernte (Fällen, Entasten, Rücken), Zerkleinerung (Hacken), Transport zum Silo beziehungsweise Zwischenlager sowie allenfalls Zwischenlagerung, nochmaliges Umladen und Transport. Der Aufwand ist dabei in erster Linie vom zu verarbeitenden Volumen und nicht vom Gewicht abhängig. Daher sind die Preise pro Energieinhalt für Nadelholz in der Regel rund 10 - 15 % höher als für Laubholz. Die Wahl der Versorgungsstrategie hängt insbesondere von den jeweiligen lokalen Rahmenbedingungen ab (Standort und Erreichbarkeit, Brennstoffmarkt und Nachfrage, vorhandene Logistik, Brennstoffversorgungsunternehmen und Infrastruktur u. a.) und muss auf die jeweiligen Anforderungen abgestimmt werden.

Wird das Holz noch im Wald (ab Rundholzpolter oder frisch geschlagen) zu Hackschnitzeln verarbeitet und von dort zum Verbraucher transportiert, spricht man von einer **direkten Versorgungskette**. Der Verzicht auf ein Zwischenlager macht dies zur kostengünstigsten Versorgungsvariante. Es bedarf jedoch einer genau geplanten und verlässlichen Brennstofflogistik, und es ist darauf zu

achten, dass die Versorgungssicherheit auch unter Extrembedingungen wie winterlichen Wetter- und Strassenverhältnissen gewährleistet ist. Zudem ist zu beachten, dass die waldfrischen Hackschnitzel einen Wassergehalt von bis zu 60 % aufweisen können.

Im Gegensatz zum oben beschriebenen Vorgehen wird bei einer **indirekten Versorgungskette** das Energieholz nach der Entnahme aus dem Wald in Form von Hackschnitzeln oder Rundholz in einer Halle oder auf einem Lagerplatz direkt beim Heizwerk oder an externen Standorten zwischengelagert. Eine Zwischenlagerung erhöht die Versorgungssicherheit, erlaubt mehr Flexibilität bei der Anlieferung und beim Brennstoffeinkauf und ermöglicht eine je nach Betriebszustand und Jahreszeit spezifische Abstimmung des eingesetzten Brennstoffmix. Insbesondere in Höhenlagen mit eingeschränkter Zugänglichkeit des Waldes oder des Heizwerkes im Winter sind Zwischenlager direkt beim Heizwerk erforderlich, um die Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Während der Lagerung erfolgt eine Vortrocknung des Brennstoffs und die hohe Flexibilität beim Brennstoffeinkauf kann Preisvorteile ergeben. Allerdings steigen die Bereitstellungskosten durch einen erhöhten Investitions- und Manipulationsaufwand. Gewisse Brennstoffe gemäss Tabelle 4.10, wie etwa Qualitäts-Hackschnitzel oder getrocknete, gesiebte Brennstoffe, können in der Regel nur über eine indirekte Versorgungskette bereitgestellt werden. Dies ist bei der Auswahl des Brennstoffs bzw. des Kessels zu berücksichtigen und mit dem Brennstofflieferanten abzusprechen (siehe Kapitel 13).

Bei einer Kombination der beiden Varianten (**gemischte Versorgungskette**) können Brennstoffzwischenlager kleiner dimensioniert und damit Kosten eingespart werden. Gleichzeitig ist eine hohe Versorgungssicherheit gewährleistet. Ist der Bau eines Zwischenlagers notwendig, sollte geprüft werden, ob zur Nutzung von Synergien ein möglichst grosser Lagerplatz zur Versorgung mehrerer Holzfeuerungen eingerichtet werden kann. Neben Hackschnitzeln kann auch Rundholz im Polter gelagert und bei Bedarf gehackt werden.

Mischsortimente: Auch Sortimente mit ungünstigen Eigenschaften lassen sich durch Beimischung höherer Qualitäten nutzen. Beispielsweise bieten sich Kombinationen aus Rinde mit hohem Wassergehalt und trockenem Restholz oder aus zu Verschlackung neigendem Landschaftspflegeholz und aschearmen Hackschnitzeln an. Mischbrennstoffe sind in der Regel kostengünstig und gewinnen zunehmend an Bedeutung. Um einen reibungslosen Anlagenbetrieb zu gewährleisten, müssen zulässige Brennstoffmischungen in Abhängigkeit der Kesselauslastung mit dem Kesselhersteller festgelegt werden. Der Wassergehalt der Brennstoffmischung ist sowohl bei Nennleistungs- als auch bei Schwachlastbetrieb (Wärmeabnahmeleistung < Minimalleistung der Feuerungsanlage) ein besonders wichtiges Kriterium.

4.6 Analytik

Als Standardverfahren zur Bestimmung des **Wassergehalts** kommt in der Regel die gravimetrische Messung der Brennstoffe mittels Trocknung bei 105 °C nach DIN EN ISO 18134-1 [45] und nach DIN EN ISO 18134-2 [46] (vereinfachtes Verfahren) zum Einsatz. Über den Masseverlust des Brennstoffs bei der Trocknung bis zur Gewichtskonstanz kann der Wassergehalt errechnet werden. Diese Methode ist anerkannt und präzise, allerdings auch zeit- und arbeitsintensiv. In der Praxis ist sowohl für Brennstoffversorgungsunternehmen als auch für Heizwerksbetreiberinnen und -betreiber häufig eine möglichst schnelle Wassergehaltsbestimmung erforderlich, beispielsweise für eine transparente Abrechnung beim An- und Verkauf oder für die Qualitätsbeurteilung einer Lieferung. Auf dem Markt ist für diesen Zweck eine Vielzahl an Schnellbestimmungsgeräten verfügbar. Die Geräte bestimmen den Wassergehalt des Brennstoffs auf unterschiedliche Art und Weise – gravimetrisch, elektrisch oder über Infrarotstrahlung. Darüber hinaus unterscheidet sich die Durchführung der Messung, zum Beispiel in Form manueller oder automatischer Messung an einer unbewegten Probe oder im Gutstrom, mobil oder stationär. Schnellmessverfahren erreichen nicht die Genauigkeit einer Bestimmung im Trockenschrank. Für Abrechnungszwecke sind sie also eher nicht geeignet. Für die qualitative Einschätzung einer Brennstoffcharge liefern sie aber hinreichend genaue Werte [47].

Die Bestimmung des **Aschegehalts** erfolgt für Biomassen standardmässig nach DIN EN ISO 18122 [48]. Im Labor wird eine Probe bei 550 °C in einem Muffelofen mit vorgeschriebener Aufheizrate in oxidierender Atmosphäre erhitzt (verbrannt). Der Verbrennungsrückstand wird rückgewogen, aus dem Massenverhältnis von Asche und Brennstoff errechnet sich der Aschegehalt.

Die Bestimmung des **Brennwerts** erfolgt standardmässig im Labor nach EN ISO 18125:2017-08 [24] in einem Bombenkalorimeter. Darin wird eine eingewogene Menge der Analyseprobe eines Brennstoffs in Sauerstoff unter hohem Druck bei festgelegten Bedingungen verbrannt.

4.7 Brennstoffliefervertrag und Abrechnung

4.7.1 Brennstoffliefervertrag

Der Brennstoffliefervertrag wird zwischen Heizwerksbetriebsgesellschaft und Brennstoffversorgungsunternehmen geschlossen und soll die unterbrechungsfreie Lieferung der für die Heizanlage geeigneten Brennstoffe garantieren. Im Vertrag müssen grundlegende Punkte festgelegt werden:

- Definition der Brennstoffsortimente
- Liefermengen und Anteile der Sortimente, Lieferungsmodalitäten
- Brennstoffpreis, Preisanpassung (Indexierung) und Abrechnungsart
- Vertragsdauer und Kündigungsfristen, Gerichtsstand

Beim Kauf und Verkauf von Energieholz ist die gehandelte Energiemenge massgebend. Diese ist jedoch von verschiedenen Brennstoffparametern (Dichte, Schüttdichte, Wassergehalt, Holzart) abhängig. Je nach Struk-

tur der Brennstoffversorgung (einer oder mehrere Lieferanten) und vorhandener Infrastruktur am Heizwerk kommen verschiedene Abrechnungsmethoden (nach Volumen, Gewicht oder erzeugter Wärmemenge) in Frage.

4.7.2 Abrechnung nach Volumen

Die Abrechnung nach Volumen ist weit verbreitet. Der Preis für eine Lieferung wird anhand von Richtwerten zum Energieinhalt pro Schüttraummeter für verschiedene Holzsortimente in Funktion des Wassergehalts festgelegt. Dies ist jedoch die ungenaueste Methode, da die Energiegehalte der gelieferten Brennstoffe aufgrund schwankender (Feststoff-)Dichten, Schüttdichten und Wassergehalte stark variieren können. Beispielsweise enthält ein Kubikmeter Buchenhackschnitzel knapp 50 % mehr Energie als ein Kubikmeter Fichtenschnitzel. Ein wichtiges Unterscheidungskriterium bei der Abrechnung nach Volumen sind daher die unterschiedlichen Dichten von Laub- und Nadelholz. Weichhölzer wie Fichte, Tanne, Kiefer, Douglasie, Lärche (allgemein Nadelholz) sowie die Weichlaubhölzer Kirsche und Erle weisen dabei geringere (Energie-)Dichten auf als Harthölzer (allgemein Laubholz: Ahorn, Eiche, Buche, Ulme, Edelkastanie, Esche, Robinie, Hainbuche, Hasel, Birke, Nuss, Obstbäume – ausgenommen Kirsche). Anhand dieser Schwankungsbreite zeigt Bild 4.5 beispielhaft für die gängigsten Holzarten den Bereich, in dem der Energieinhalt je Volumeneinheit (abhängig vom Wassergehalt des Brennstoffs) liegen kann, sowie Preisspannen für die volumenbasierte Abrechnung von Hackschnitzeln, basierend auf einem beispielhaften Durchschnittspreis von 30 €/MWh [49].

Einen noch grösseren Einfluss als die schwankende Feststoffdichte hat beim Handel von Hackschnitzeln jedoch die Schüttdichte des Brennstoffs. Diese wird im Wesentlichen von Partikelgrösse, Feingutanteil und durch äussere Einflüsse wie eine Verdichtung durch Rütteln beim Transport bestimmt. In der DIN EN ISO 17225-1 sind Schüttdichten für Holzhackschnitzel zwischen 150 kg/Srm und 450 kg/Srm angegeben. Unzureichende Kenntnisse in Bezug auf Wassergehalt oder Schüttdichte des Brennstoffs können leicht zu erheblichen Preisabweichungen führen. Daher ist diese Abrechnungsmethode nicht beziehungsweise nur unter der Voraussetzung, dass die Brennstoffparameter hinreichend genau bekannt sind, zu empfehlen.

Vorteil der Abrechnung nach Volumen:

- Einfache Bestimmung des Volumens

Nachteil der Abrechnung nach Volumen:

- Grosse Unsicherheit bezüglich des Energieinhaltes

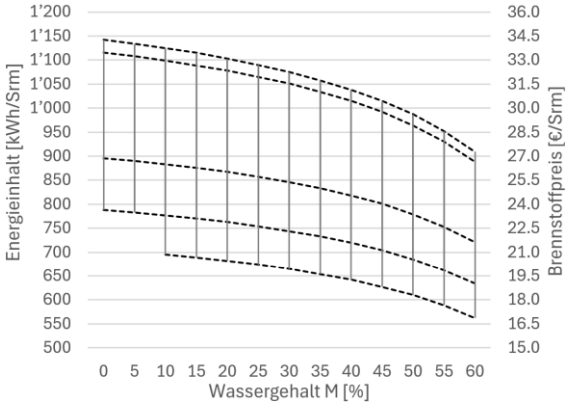


Bild 4.5 Volumenbezogener Energieinhalt und Richtwerte für Brennstoffpreise von Hackschnitzeln in Abhängigkeit des Wassergehalts für verschiedene Holzarten (Berechnungsgrundlage 30 €/MWh) [25].
Von oben nach unten:
Eiche (Raumdichte 571 kg/Fm_{wf})
Buche (558 kg/Fm_{wf})
Kiefer (431 kg/Fm_{wf})
Fichte (379 kg/Fm_{wf})
Pappel (353 kg/Fm_{wf})

4.7.3 Abrechnung nach Gewicht

Bei einer Abrechnung nach Gewicht, die bei grösseren Anlagen üblich ist, wird der Wassergehalt des Brennstoffs berücksichtigt. Der Preis für eine Lieferung wird anhand des Energieinhalts pro Tonne wasserfreien Brennstoffs festgelegt. Beispielsweise haben waldfrische Holzhackschnitzel mit einem Wassergehalt von 50 % einen Heizwert von 2.3 kWh/kg (Bild 4.6). Bei einer Anlieferung von 20 Tonnen entspricht dies einer Energiemenge von 46 MWh. Für einen durchschnittlichen Preis von 30 €/MWh ergibt sich ein Preis von 1’380 € für eine LKW-Ladung von 20 Tonnen.

Während der Wassergehalt erheblichen Einfluss auf die gehandelte Energiemenge hat, unterscheiden sich die massebezogenen Heizwerte zwischen Nadel- und Laubholz eher geringfügig. Aufgrund des höheren Gehaltes an Harzen und Lignin übersteigt der Heizwert von Nadelhölzern in der Regel leicht den Heizwert von Laubholz (massebezogen). Als natürlicher Brennstoff unterliegen diese Werte jedoch einer natürlichen Schwankungsbreite (Tabelle 4.9, Bild 4.6).

Die Gewichtsbestimmung erfolgt meistens durch Wägen des Lastwagens vor und nach dem Entladen. Bei Nutzung von im Lastwagen integrierten Gewichtssensoren ist eine ausreichende Genauigkeit durch den Lieferanten zu garantieren. Für eine repräsentative Bestimmung des Wassergehalts einer Lieferung (Kapitel 4.6) sollten entweder mehrere Proben oder eine repräsentative Mischprobe untersucht werden.

Vorteile der Abrechnung nach Gewicht:

- Unabhängig von Holzart und Schüttdichte
- Hohe Genauigkeit bezüglich des Energieinhaltes

Nachteil der Abrechnung nach Gewicht:

- Messung von Gewicht und Wassergehalt notwendig

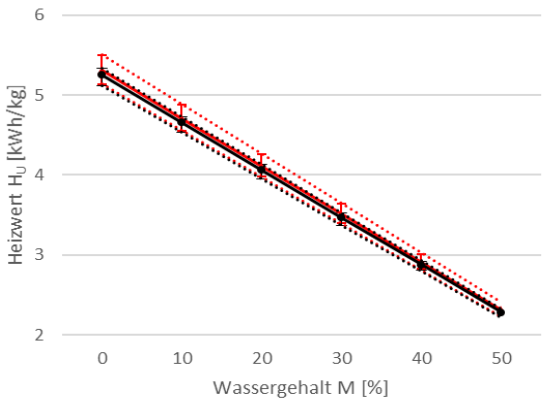


Bild 4.6 Massebezogener Heizwert von Nadelholz (rot) und Laubholz (schwarz) in Abhängigkeit des Wassergehalts.

4.7.4 Abrechnung nach erzeugter Wärmemenge

Die Abrechnung nach erzeugter Wärmemenge erfordert einen Wärmezähler im Primärkreis des Heizkessels, der die in der Anlage freigesetzte Wärmemenge erfassen kann. Dieser muss fachgerecht und den technischen Richtlinien des Wärmemengenzählers entsprechend eingebaut werden und einwandfrei funktionieren (siehe auch Kapitel 7.4.3). Es besteht jedoch eine Differenz zwischen dem Energieinhalt des Brennstoffs und der gemessenen Energiemenge, die durch anlagentechnische Verluste bedingt wird. Dementsprechend müssen die Vertragsparteien das Vorgehen zur Abrechnung im Liefervertrag festlegen. Beispielsweise wird ein Brennstoffpreis in € pro MWh erzeugter Wärme bei einem definierten Jahresnutzungsgrad der Anlage (z. B. 85 %) vereinbart. Der Jahresnutzungsgrad wird dabei mit einer Formel bestimmt, die den Kesselwirkungsgrad und die Bereitschaftsverluste berücksichtigt (Kapitel 20.12). Weicht der tatsächliche Jahresnutzungsgrad vom vereinbarten Wert ab, wird der Brennstoffpreis linear angepasst.

Diese Abrechnungsart setzt voraus, dass der gesamte (in einem mit Wärmezähler ausgestatteten Heizkreis) eingesetzte Brennstoff von einem einzigen Unternehmen bezogen wird. Bei einem entsprechenden Liefervertrag genügt dann eine periodische Ablesung der erzeugten Wärmemenge zur Verrechnung des gelieferten Brennstoffs. Es können aber auch andere beziehungsweise abgewandelte Methoden (z. B. mit Einbezug zusätzlicher Qualitätskriterien oder mit Berücksichtigung mehrerer Versorgungsunternehmen) angewendet werden.

Die Abrechnung nach erzeugter Wärmemenge bietet ein geringes Risiko für die Betriebsgesellschaft von Heizwerken, da Verluste durch Schwankungen im Heizwert, zum Beispiel durch lagerungsbedingten Substanzabbau, vom Brennstofflieferanten getragen werden. Das Brennstoffversorgungsunternehmen sollte daher auf geeignete Lagerbedingungen an der Anlage oder auf eine Just-in-time-Bereitstellung achten.

Vorteile der Abrechnung nach Wärmemenge:

- Unabhängig vom Wassergehalt
- Unabhängig von Holzart und Schüttdichte

Nachteile der Abrechnung nach Wärmemenge:

- Abhängig vom Jahresnutzungsgrad der Anlage
- Abschätzung des Jahresnutzungsgrads notwendig

5 Komponenten der Wärmeerzeugung

5.1 Einsatzgebiete

Automatische Holzfeuerungen werden in einem breiten Leistungsbereich angeboten (Bild 5.1). Das Spektrum reicht von der Beheizung eines Einfamilienhauses bis hin zu Kraftwerkskesseln mit über 100 MW Feuerungswärmeleistung. Die häufigsten Anwendungen für Holzheizwerke finden sich im mittleren Leistungsbereich zwischen 200 kW und 2 MW, wo sowohl Holzhackschnitzel aus dem Wald als auch Restholz aus der Holzverarbeitung als Brennstoff eingesetzt werden. Im Folgenden werden die Grundprinzipien, Einsatzgebiete und häufigsten Bauformen der wichtigsten Feuerungstypen beschrieben. Der eingesetzte Brennstoff und die Feuerungstechnologie bedingen sich gegenseitig. Daher ist für die Auswahl und den Betrieb automatischer Holzfeuerungen die Beurteilung des Energieholzsortiments nach anlagentechnischen Kriterien entscheidend. Diese umfassen die Stückgrösse, den zulässigen Anteil an Überlängen, Rinde und Feinanteil sowie den Wassergehalt (Kapitel 4). Tabelle 5.1 gibt einen Überblick über die wichtigsten Bauarten von Holzfeuerungen, deren übliche Leistungsbereiche und Brennstoffe. Kapitel 13 geht näher auf die Auswahl der geeigneten Feuerungstechnologie in Abhängigkeit des verfügbaren Brennstoffs ein.

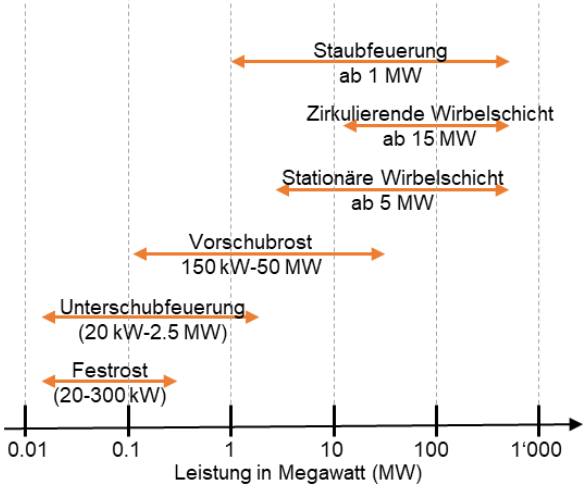


Bild 5.1 Einsatzgebiete der wichtigsten Bauarten von Holzfeuerungen.

Tabelle 5.1 Einsatzgebiete der wichtigsten Bauarten von Holzfeuerungen.

Typ	Leistungsbereich	Brennstoffe	Wassergehalt [%]	Aschegehalt [% wf]
Festrost	20 kW - 300 kW	Hackschnitzel	10 - 35	
Unterschubfeuerung	20 kW - 2.5 MW	Hackschnitzel, Sägespäne, Pellets, max. Staubgehalt 50 %	5 – 50*	< 2
Vorschubrost	150 kW - 50 MW	Pellets, Hackschnitzel und die meisten Biomassen, max. Staubgehalt 50 %	5 - 60	< 50
Stationäre Wirbelschicht	ab 5 MW ab 20 MW	Verschiedene Biomassen Durchmesser < 10 mm Durchmesser < 80 mm	5 - 60	< 10
Zirkulierende Wirbelschicht	15 MW - 100 MW	Verschiedene Biomassen Durchmesser < 10 mm	5 - 60	< 10
Staubfeuerung	1 MW - 100 MW	Verschiedene Biomassen Durchmesser < 5 mm	i. d. R. < 20	< 2

* Meist bis M35, bei genügend langer ungekühlter Ausbrandzone bis M50 möglich

5.2 Grundlagen der Verbrennung

Bei der Verbrennung in energietechnischen Anlagen soll die im Brennstoff gebundene Energie komplett freigesetzt werden. Hierzu bedarf es einer vollständigen Verbrennung. Feuerungstechnische Anlagen sind deshalb möglichst so zu konzipieren und auszulegen, dass eine vollständige Verbrennung auch bei schwankenden Brennstoffqualitäten möglich ist. Aufgabe des Anlagenbetreibers ist es dann, die Anlage so zu betreiben, dass eine vollständige Verbrennung realisiert wird, sodass die organischen Brennstoffbestandteile möglichst vollständig zu CO_2 und H_2O umgewandelt werden. Der Verbrennungsprozess fester Brennstoffe kann in folgende Teilprozesse untergliedert werden (Bild 5.2):

- Aufheizung und Trocknung
- Entgasung und Pyrolyse
- Verbrennung der flüchtigen Brennstoffbestandteile
- Ausbrand der festen Brennstoffbestandteile

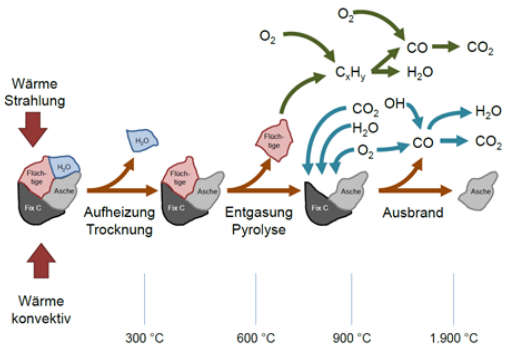


Bild 5.2 Vereinfachtes Verbrennungsprozessschema.

Abhängig von der Feuerungsart müssen die dargestellten Teilprozesse nicht zwingend nacheinander ablaufen, sondern sie können sich zum Teil auch überlagern. Zu Beginn des Verbrennungsprozesses wird das im Brennstoff enthaltene Wasser verdampft, das heisst der Brennstoff wird erwärmt und dabei getrocknet. Während der weiteren Aufheizung des Brennstoffs beginnt die Pyrolyse, wobei die leicht flüchtigen Brennstoffbestandteile entweichen und in die Gasphase übergehen. Dabei entsteht eine brennbare Gasmischung, sodass beim Erreichen der entsprechenden Zündtemperatur die Verbrennung beginnt. Im weiteren Verlauf reagieren auch die verbliebenen festen Brennstoffbestandteile mit dem zur Verfügung stehenden Sauerstoff aus der Verbrennungsluft. Bei dieser chemischen Umwandlung der organischen Brennstoffbestandteile wird zwischen homogenen (beide Reaktionspartner gasförmig) und heterogenen (Reaktion zwischen Feststoff und Gasphase) Reaktionen unterschieden. Dabei ist die heterogene Verbrennung fester Brennstoffe wesentlich aufwendiger und anspruchsvoller als die homogene Verbrennung gasförmiger Brennstoffe, wie beispielsweise Erdgas.

5.3 Feuerungstechnologien

5.3.1 Übersicht

Im Folgenden werden die in Biomasseheiz(kraft)werken gängigsten Feuerungstechnologien erläutert, die grundsätzlich in Festbett-, Wirbelschicht- und Staubfeuerungen unterteilt werden können (Bild 5.3).

Die für die Trocknung und Entgasung notwendige Wärme wird während des Heizbetriebs je nach Feuerungsart auf unterschiedliche Weise zugeführt. Bei Staubfeuerungen werden die eintretenden Brennstoffpartikel mit heissen Abgasen in Kontakt gebracht. Bei Wirbelschichtfeuerungen wird die Wärme durch Feststoffpartikel im Wirbelbett übertragen. In diesen Fällen erfolgt die Wärmeübertragung also konvektiv. Bei Rostfeuerungen erfolgt die Wärmezufuhr primär durch die Strahlungsabgabe der umliegenden Feuerraumwände. Beim Anfahren der Feuerung werden zur Zündung des Brennstoffs entweder elektrische Heissluftgebläse (Brennstoffe mit niedrigem Wassergehalt < 35 %, Anlagen im kleineren Leistungsbereich bis 900 kW) oder gasbefeuerte Zündbrenner (höhere Leistungsbereiche > 900 kW, max. Brennstofffeuchte ungefähr 55 %) eingesetzt.

Es ist grundsätzlich zwischen Standard-Seriengeräten und individuell abgestimmten Industriekesseln zu unterscheiden. Mit zunehmender Verschlechterung der Brennstoffqualität, das heisst feuchteres Material, uneinheitlichere und gröbere Stückigkeit, Besatz mit Nadeln, Rinde und Laub sowie allenfalls höherem Fremdstoffanteil, muss robustere und aufwendigere Technik eingesetzt werden. Diese aufwendige Technik ist bei kleineren Anlagen bedingt technisch realisierbar. Zusätzlich führt die notwendige Technologie zu höheren spezifischen Investitionskosten (€/kW installierte Leistung).

Während die spezifischen Investitionskosten für Seriengeräte relativ gering sind, stellen diese Anlagen hohe Anforderungen an die Brennstoffqualität. Standard-Seriengeräte eignen sich für trockene Brennstoffe, beispielsweise Hackschnitzel mit Wassergehalt < 35 %, und sind bis zu einer Leistung von üblicherweise 500 kW, selten bis 1’500 kW verfügbar. Der trockene, fliessfähige Brennstoff kann durch kostengünstige Siloaustragungssysteme zum Kessel transportiert werden. Solche Geräte eignen sich nicht für waldfrische Holzhackschnitzel. Erfahrungen zeigen ein Risiko für Kaminbrände, Überschreiten der Emissionsgrenzwerte, erhöhte Verschmutzung und Anlagenverschleiss, Geruchsbelästigung sowie Probleme beim Hackschnitzelaustrag aus dem Silo bei zu feuchtem Brennstoff. Feuerungssysteme für waldfrische Hackschnitzel haben sich auch im niedrigen Leistungsbereich > 150 kW weiterentwickelt. Zwar sind die spezifischen Investitionskosten für den Kessel hier höher (bis zu 50 % bei gleicher Kesselleistung), jedoch weisen solche Industriekessel eine deutlich grössere Brennstoffflexibilität auf. Höhere Kapitalkosten lassen sich, besonders in Kombination mit langen Betriebszeiten, durch niedrigere Brennstoffkosten kompensieren.

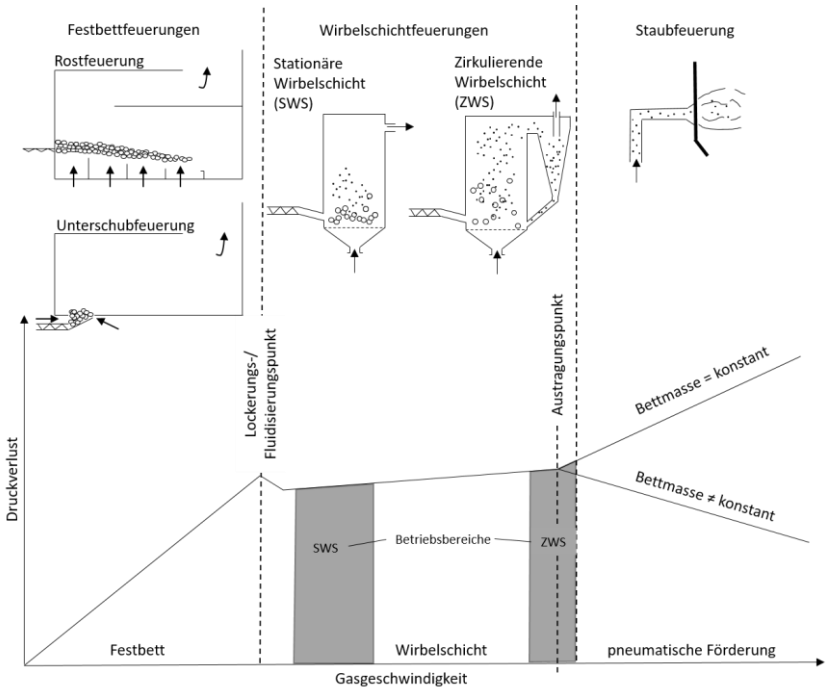


Bild 5.3 Übersicht Feuerungstechnologien. Einteilung nach Strömungsgeschwindigkeit des Brenngases durch die Anlage und Art des Brennstofftransports.

5.3.2 Festbettfeuerungen

Bei einer **Unterschubfeuerung** (Bild 5.4) wird der Brennstoff mit einer Förderschnecke von unten in eine Feuermulde (Retorte) eingeschoben. Dort erfolgen Trocknung und Entgasung des Brennstoffs sowie der Abbrand der Holzkohle. Für eine vollständige Oxidation der brennbaren Gase wird vor dem Eintritt in die heisse Nachbrennkammer Sekundärluft zugegeben und mit den heissen Brenngasen vermischt. Im nachgeschalteten Wärmeübertrager erfolgen die Wärmeabgabe der heissen Abgase und die Abgasreinigung. Die Rostasche muss in der Regel manuell entascht werden, es gibt aber auch Feuerungen mit automatischen Entaschungssystemen am Markt, die über einen beweglichen Nachbrennrost und eine Entaschungsschnecke verfügen. Die Kesselnennleistung von Unterschubfeuerungen ist nach oben hin mit etwa 2.5 MW_{th} begrenzt. Sie eignen sich besonders für feinkörnige Holzbrennstoffe wie Sägespäne, Pellets oder Hackgut (maximale Korngrösse 50 mm) mit einem Wassergehalt von 5 - 50 %. Die Gestaltung von Feuerraum und Nachbrennkammer muss dem Wassergehalt angepasst sein. Bei aschereichen Brennstoffen treten Probleme bezüglich der Ascheaustragung aus dem heissen Feuerraum auf. Darüber hinaus können gesinterte oder geschmolzene Ascheschichten an der Brennstoffoberfläche das Entweichen der Verbrennungsgase aus dem Glutbett kurzzeitig blockieren, was instationäre Verbrennungszustände bei jedem Gasdurchbruch zur Folge hat. Die Investitionskosten von Unterschubfeuerungen sind niedriger als diejenigen von Rostfeuerungen. Kontinuierlicher Brennstoffeintrag und ein stabiles, ruhiges Brennstoffbett ermöglichen eine einfache und gute Leistungsregelung und einen emissionsarmen Schwachlastbetrieb. Diese Bauart wird allerdings immer seltener eingesetzt.

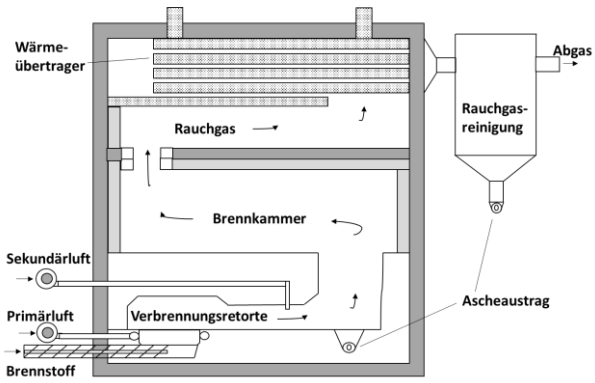


Bild 5.4 Funktionsprinzip einer Unterschubfeuerung.

In vollautomatischen Holzfeuerungen kommen häufig Rostfeuerungen mit **Kipprosten** zum Einsatz (Bild 5.5). Diese können aus ein bis drei drehbaren Elementen bestehen. Es erfolgt keine aktive Bewegung des Brennstoffs auf dem Rost. Der Brennstoff wird im geschlossenen Zustand (1) auf den Rost geschoben, der die Grundlage für ein ruhiges Glutbett bildet. Nach einer bestimmten Betriebsdauer (z. B. 8 Stunden) wird die Brennstoffzufuhr gestoppt. Dann wird der gesamte Rost oder ein Element davon zur Seite gekippt und geöffnet (2). Die Asche fällt nach unten. Auf dem Rostbereich, der nicht gekippt wurde, bleibt eine Restglutzone bestehen. Dadurch kann Energie für ein erneutes Zünden nach dem Schliessen des Rostes eingespart werden. Ein Kipprost mit zwei Elementen wird auch Stufenbrecherrost genannt. Eine Öffnung beider Elemente ermöglicht die vollständige Reinigung der Brennkammer.

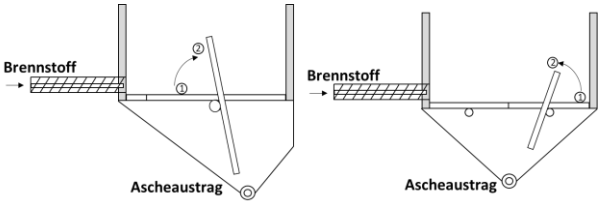


Bild 5.5 Funktionsprinzip der Brennstoffbelegung und Entaschung beim Kipprost (links) oder Stufenbrecherrost (rechts); (1) geschlossene Position, (2) offene Position.

Bei einer **Vorschub-Rostfeuerung** (Bild 5.6) wird der Brennstoff horizontal auf den Rost geschoben (Förderschnecke oder hydraulischer Einschub) und durch die Bewegung der Rostelemente weiter durch den Brennraum befördert. Am Rostende erfolgt die Entaschung. Ein Teil der Verbrennungsluft wird als Primärluft durch den Rost zugeführt, der in mehrere Zonen unterteilt werden kann. Innerhalb der ersten Zone erfolgt die Trocknung des Brennstoffs, gefolgt von der Entgasung im mittleren Bereich (dies ist die Hauptverbrennungszone) und dem Ausbrand der Holzkohle im letzten Bereich. Eine zonenweise kontrollierte Primärluftzufuhr durch den Rost ermöglicht eine Anpassung an das Abbrandverhalten des Brennstoffs, einen kontinuierlichen Teillastbetrieb sowie die Einstellung einer reduzierenden Atmosphäre in der Primärverbrennungszone. Die Sekundärluft wird über dem Rost oder, für eine NO_x-Reduktion vorteilhafter, mit räumlicher Trennung in der Sekundärverbrennungszone mit den brennbaren Gasen für den Ausbrand in der nachfolgenden Brennkammer vermischt.

Der Rost erfüllt die Funktionen des Brennstofftransports sowie des Schürens und Umwälzens zur Homogenisierung des Brennstoffbetts und zur Verbesserung des Luftdurchtritts. Um eine gleichmässige Primärluftversorgung der verschiedenen Rostzonen zu gewährleisten, ist eine möglichst homogene Brennstoffbelegung des Rostes erforderlich. Entscheidend für einen effizienten Betrieb ist daher eine korrekte Einstellung der Vorschubtakte der einzelnen Rostelemente, um für eine gleichmässige, langsame Rostbewegung zu sorgen. Eine inhomogene Belegung kann zu Verschlackung, dem Aufwirbeln unverbrannter Partikel und hohen Flugascheanteilen führen. Dies macht einen höheren Luftüberschuss zur Erzielung einer vollständigen Verbrennung notwendig (Schlierenbildung). Zu hohe Bewegungsfrequenzen der Rostelemente führen zu unverbranntem Kohlenstoff in der Asche oder ungenügender Brennstoffbelegung des Rostes. Infrarot-Lichtschranken, die über die verschiedenen Rostzonen verteilt sind, werden zur Glutbetthöhenkontrolle und Regulierung der Vorschubtakte eingesetzt.

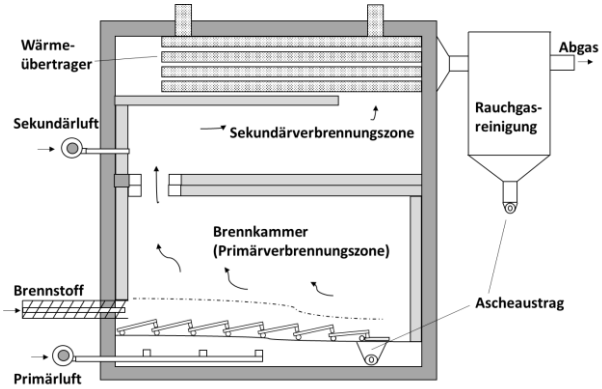


Bild 5.6 Funktionsprinzip einer Vorschub-Rostfeuerung.

Rostfeuerungen sind für Brennstoffe mit hohem Aschegehalt, unterschiedlicher Stückigkeit und hohen Wassergehalten geeignet. Ein Teil der bei der Verbrennung freigesetzten Energie wird zur Verdampfung des im Brennstoff enthaltenen Wassers benötigt. Ein Strahlungsmantel über dem Brennstoff sorgt für eine hohe Entgasungstemperatur. Für den Einsatz von Brennstoffen mit > 50 % Wassergehalt hat die Feuerung zwingend einen ungekühlten Ausbrandzug aufzuweisen. Vorschub-Rostfeuerungen werden hauptsächlich nach dem Gegenstrom-Prinzip realisiert. Dieses erlaubt eine gezielte Abgasrezirkulation. Bei Brennstoffen mit hohen Wassergehalten werden zudem die heissen Verbrennungsgase über den mit frischem Brennstoff belegten Rost zurückgeleitet, sodass in der ersten Zone des Rostes eine Brennstoffvortrocknung erfolgt. So können Brennstoffe mit bis zu 60 % Wassergehalt eingesetzt werden. Daneben werden aufgrund der Bewegungsrichtung von Brennstoff und Gasen zwei weitere Typen von Feuerraumgeometrien unterschieden: Gleichstrom und Mittelstrom (Bild 5.7).

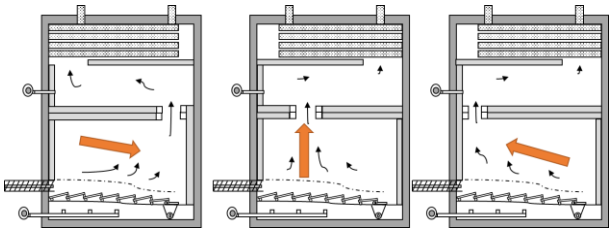


Bild 5.7 Bauprinzipien von Rostfeuerungen; Gleichstrom (links), Mittelstrom (Mitte) und Gegenstrom (rechts).

Mit Hilfe von Gebläsen wird Primärverbrennungsluft von unten durch den Rost und das Brennstoffbett und Sekundärluft in der Nachverbrennungszone zugegeben. Unterstützt wird die Luftzugabe an den unterschiedlichen Stellen durch einen Abgasventilator, der für einen Unterdruck im gesamten System sorgt. Eine homogene Stückigkeit der Hackschnitzel mit geringem Feingutanteil ist wichtig für eine gleichmässige Luftzufuhr und emissionsarme Verbrennung. In Holzheizwerken sind der schräge und der horizontale Vorschubrost am meisten verbreitet. Der Rost ist alternierend aus fixierten und beweglichen Rostelementen zusammengesetzt. Der Brennstofftransport erfolgt durch periodisches Vor- und Zurückbewegen

der beweglichen Rostelemente. Dadurch werden unverbrannte und verbrannte Brennstoffpartikel vermischt, die Oberfläche des Brennstoffbettes erneuert und eine homogene Brennstoffbelegung des Rostes erreicht. Der horizontale Vorschubrost verfügt über schräg gestellte Rostelemente. Durch deren Bewegung wird eine sehr homogene Rostbelegung bewirkt und Schlackenbildung infolge lokaler Überhitzung weitgehend verhindert. Ein Vorteil gegenüber dem schrägen Vorschubrost ist die kompaktere Bauweise.

Bei Brennstoffen mit niedrigem Ascheschmelzpunkt sowie bei sehr trockenen Brennstoffen ist in vielen Fällen eine Rostkühlung (durch Wasser oder Luft) notwendig. Ein weiteres Mittel zur Kontrolle der Feuerraumtemperatur beziehungsweise der Temperatur des Brennstoffbetts auf dem Rost ist die Abgasrezirkulation. Zur Vermeidung von Schlackenbildung im Brennstoffbett ist der Einsatz einer Primär-Abgasrezirkulation zu prüfen. Dabei wird ein Teil des CO_2-reichen und sauerstoffarmen Abgasstroms zusammen mit der Verbrennungsluft in das Brennstoffbett geleitet. Das Mischverhältnis wird durch das gewünschte unterstöchiometrische Verbrennungsluftverhältnis (Luftmangel) bestimmt. Überhitzungen im Feuerraum, welche Schlackenbildung und einen hohen Verschleiss an der Feuerraumauskleidung verursachen, können durch eine Sekundär-Abgasrezirkulation verhindert werden. Dabei wird ein Teil des CO_2-reichen und sauerstoffarmen Abgasstroms getrennt oder zusammen mit der Sekundärluft in den Feuerraum geleitet. Die Temperatur des Brennstoffbetts oder der Ausbrandzone kann so um bis zu 200 K gesenkt und der erforderliche Wartungs- und Instandhaltungsaufwand vermindert werden.

5.3.3 Wirbelschichtfeuerung

In einer Wirbelschichtfeuerung gibt es kein festes Brennstoffbett. Der Brennstoff wird zusammen mit heissem Bettmaterial, einem körnigen Inertstoff, meist Sand und Asche, durch schnell einströmende Primärluft (meist mit Rezirkulationsgas-Anteil) aufgewirbelt. Die Teilchen befinden sich dadurch in einem fluidisierten Zustand. Das Bettmaterial erfüllt dabei die Funktion der Wärmeübertragung. Es nimmt die freigesetzte Verbrennungswärme auf und gibt sie im gesamten Wirbelbett wieder ab. Die gute Durchmischung und die sehr homogene Temperaturverteilung schaffen gute Voraussetzungen für die thermische Umsetzung des Brennstoffs. Durch die hohen Luftgeschwindigkeiten kommt es im Wirbelbett zu einem höheren Druckabfall, was höhere Leistungen der verwendeten Gebläse erfordert (etwa 100 mbar mehr im Vergleich zu Rostfeuerungen). Während des Anfahrens der Feuerung muss zunächst das Bettmaterial mit Hilfe eines meist gas- oder ölbetriebenen Startbrenners auf rund 600 °C erhitzt werden, bevor Brennstoff in den Brennraum gegeben werden kann.

Wirbelschichtfeuerungen eignen sich für Brennstoffe mit unterschiedlichen Wasser- und Aschegehalten. Die Verbrennungstemperatur muss unterhalb der brennstoffabhängigen Ascheerweichungstemperatur gehalten werden, da mit steigender Temperatur die Neigung zu Verschlackung, Korrosion und Agglomeration des Bettmaterials zunimmt. Zur Abscheidung von Schwefel und Chlor eignet sich eine Zugabe von Additiven (z. B. Kalkstein) direkt in den Brennraum. So kann die Freisetzung von Schadstoffen wie SO_x und Halogenverbindungen ohne grösseren apparativen Aufwand vermieden werden. Aufgrund relativ niedriger Verbrennungstemperaturen wird praktisch kein thermisches NO_x gebildet. Die Bildung von NO_x aus dem im Brennstoff enthaltenen Stickstoff kann durch einen niedrigen Luftüberschuss kontrolliert werden (Luftstufung) [50]. Wirbelschichtfeuerungen eignen sich daher gut für die energetische Nutzung biogener Reststoffe.

Es wird zwischen stationären und zirkulierenden Wirbelschichtfeuerungen unterschieden. Bei Gasgeschwindigkeiten von 1 bis 2 m/s bildet das Bettmaterial eine **stationäre Wirbelschicht**. Oberhalb dieser Schicht wird der Brennstoff in den Brennraum gegeben, fällt auf das Wirbelbett und entgast dort. Eine vollständige Oxidation der dabei freigesetzten brennbaren Gase erfolgt im Freiraum darüber unter Zugabe der Sekundärluft. Es ist keine besondere Brennstoffaufbereitung erforderlich, ausreichend sind Korngrössen < 10 mm. Aufgrund der Bettabmessungen ist diese Technologie für Anlagen bis etwa 80 MW geeignet. Bei höheren Gasgeschwindigkeiten (5 bis 10 m/s) wird zunehmend Bettmaterial aus dem Wirbelbett ausgetragen. Nach dem Austritt aus der Brennkammer wird es wieder abgeschieden und zurückgeführt (**zirkulierende Wirbelschicht**, Bild 5.8). Gegenüber der stationären Wirbelschicht bietet diese Technologie den Vorteil, dass bei Zugabe von Additiven die Feststoffe intensiver durchmischt werden, was den Additiv-Verbrauch reduziert.

Aus wirtschaftlichen Gründen kommt besonders die zirkulierende Wirbelschicht erst ab einer Anlagegrösse von etwa 15 MW zum Einsatz.

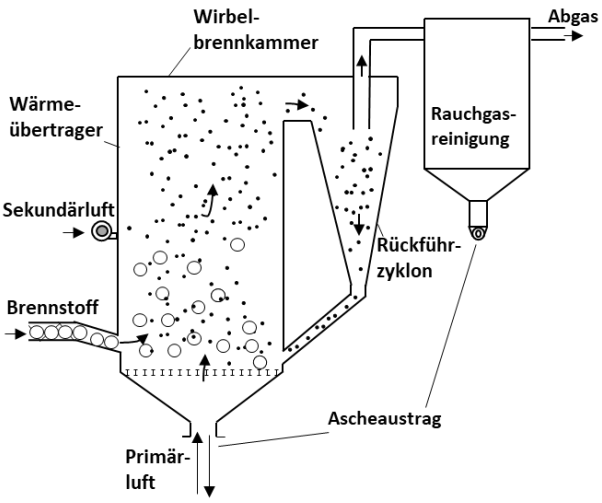


Bild 5.8 Funktionsprinzip einer zirkulierenden Wirbelschichtfeuerung.

5.3.4 Staubfeuerung

Brennstoffe mit einem Staubgehalt > 50 %, wie sie typischerweise in der holzverarbeitenden Industrie anfallen, eignen sich nicht mehr für den Einsatz in einer Unterschub- oder Rostfeuerung. Dies würde eine Aufbereitung durch Brikettierung oder Pelletierung (Kapitel 4.5) erfordern. Daneben kann der Brennstoff auch direkt in einer Staubfeuerung eingesetzt werden. Diese Feuerungstechnologie kann mit anderen (z. B. einer Rost- oder Wirbelschichtfeuerung) kombiniert werden und ermöglicht eine Brennstoffstufung (Kapitel 5.7).

Bei Einblas- oder Staubfeuerungen wird der staubförmige Brennstoff (maximale Partikelgrösse 10 bis 20 mm, Wassergehalt < 20 %) pneumatisch in den Brennraum eingebracht. Dabei wirkt die Trägerluft als Primärluft. Brennstoffpartikel beginnen nach Eintritt in die Feuerung sofort zu entgasen. Die Verbrennung der flüchtigen Bestandteile erfolgt durch Zugabe von Sekundär- und Tertiärluft.

Eine Staubfeuerung wird häufig in Form eines Drallbrenners ausgeführt (Bild 5.9). Dabei werden Primär-, Sekundär- und Tertiärluftstrahlen konzentrisch durch ringförmige Düsen in den Feuerraum eingeblasen. Im Zentrum der Flamme befinden sich der Primärluftstrom und die Brennstoffdüse; hier bildet sich eine Primärverbrennungszone. Nach aussen hin wird durch schneller strömende Sekundär- und Tertiärluftströme, die die Abgase ansaugen und im weiteren Verlauf oxidieren, eine Luftstufung erzielt (Bild 5.10).

Aufgrund der guten Durchmischung von Brennstoff und Luft sowie der geringen Korngrösse der Brennstoffpartikel wird eine hohe Ausbrandqualität mit geringen CO-Emissionen erreicht (vollständige Verbrennung). Die Brennstoffzufuhr ist stufenlos bis zu einer Teillast von etwa 25 % der Nennlast ohne wesentlichen Einfluss auf die Verbrennungseigenschaften regelbar. Ein weiterer Vorteil dieser Technologie sind geringe NO_x-Werte durch die Luftstufung und normalerweise geringe erforderliche Luftüberschüsse. Wegen der hohen Verbrennungstemperatur und damit der hohen Energiedichte an den Wänden des Brennraums sollte die Möglichkeit einer Kühlung durch Wasser oder Abgasrezirkulation vorgesehen werden. Hohe thermische Belastung und Erosion können zu einer schnellen Abnutzung des Schamotts führen ([51], [52]).

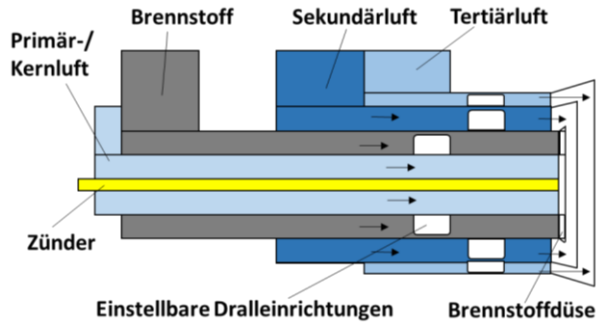


Bild 5.9 Schnitt durch einen Drallbrenner.

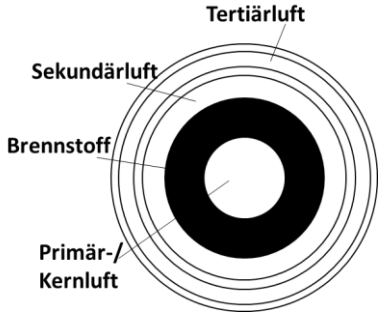


Bild 5.10 Prinzip der Luftstufung innerhalb der Flamme eines Drallbrenners (Blick von vorne auf Luft- und Brennstoffdüsen).

5.4 Wärmeübertragung im Kesselteil

Die im Feuerraum freigesetzte Wärme wird über einen Wärmeübertrager (umgangssprachlich auch Wärmetauscher) von den heissen Abgasen an ein zirkulierendes Wärmeträgermedium, meist flüssiges oder dampfförmiges Wasser, in WKK-Anlagen oder für Prozesswärme auch Thermoöl, abgegeben. Entscheidend für einen hohen Kesselwirkungsgrad (Kapitel 20.11) und damit einen effizienten Betrieb ist ein hoher Wärmeübergang. Um diesen zu gewährleisten, müssen die Wärmeübertragerflächen in regelmässigen Abständen von betriebsbedingten Ablagerungen gereinigt werden (siehe Kapitel 5.5).

Abhängig von den jeweiligen Anforderungen werden verschiedene Bauarten, Arbeitsprinzipien (Gleich-, Gegen- oder Kreuzstrom) und Aufbauten (liegend oder stehend) verwendet. Bei Biomassekesseln sind der Rauchrohr- oder auch Abgasrohrkessel (Abgasstrom rohrseitig) und der Wasserrohrkessel (Abgasstrom mantelseitig) weit verbreitet. Befindet sich das Wärmeträgermedium innerhalb des Wärmeübertragerrohrs, das auf der Aussenseite Kontakt zum heissen Abgas hat, spricht man von einem Wasserrohrkessel. Der Wasserrohrkessel ist die vorherrschende Bauart zur Dampferzeugung. Beim Rauchrohrkessel wird das heisse Abgas durch Rohre geleitet, die auf der Aussenseite vom Wärmeträgermedium umspült werden. Diese Bauart wird bei Wasser als Wärmeträger auch als Grosswasserraumkessel bezeichnet und wird überwiegend für Anlagen zur Warmwassererzeugung eingesetzt. In den Rauchrohren befinden sich meist sogenannte Wirbulatoren (auch Turbulatoren). Diese spiralförmigen Bauteile verwirbeln die durchströmenden Abgase und verbessern so die Wärmeübertragung an das Wärmeübertragerrohr. Turbulatoren dienen gleichzeitig auch als Reinigungseinrichtung (Kapitel 5.5).

Taupunktunterschreitungen im Abgas führen zur Kondensation möglicherweise korrosiver Gasbestandteile. Dabei sind sowohl der Wassergehalt als auch der Gehalt von Schwefel und Chlor im Brennstoff von Bedeutung. Unabhängig vom Schwefel- oder Chlorgehalt steigt der Wasserdampfpartialdruck und damit der Taupunkt im Abgas mit zunehmendem Wassergehalt des Brennstoffs.

Der Säuretaupunkt im Abgas erhöht sich sowohl mit zunehmendem Gehalt von Schwefel und Chlor als auch mit steigendem Anteil Wasserdampf, abhängig vom Wassergehalt im Brennstoff und dem Luftüberschuss. Bei Brennstoffen mit erhöhten Schwefel- oder Chlorgehalten (z. B. Altholz, Holz aus der Landschaftspflege, insbesondere von Strassenböschungen, Restholz aus der Holzverarbeitung) steigt der Säuretaupunkt deutlich über den von Wasserdampf auf > 100 °C bis zu 200 °C [53].

Werden die Abgase unter die jeweiligen Säuretaupunkte abgekühlt, treten Schwefel- oder Salzsäure auf, welche für Korrosionsschäden (Oberflächenkorrosion, Lochkorrosion) verantwortlich sind. Entscheidend für die Vermeidung von Korrosionsproblemen ist jedoch nicht allein die Abgastemperatur, sondern die Temperatur der Oberflächen, mit denen die Abgase in Kontakt kommen. Um Probleme mit Korrosion an den Wärmeübertrageroberflächen im Kessel gering zu halten, wird von den Kesselherstellern eine Mindesteintrittstemperatur des Wassers in den Kessel vorgeschrieben. Je höher der Wassergehalt, desto höher sollte die Mindesteintrittstemperatur gewählt werden. Die minimale Kesselrücklauftemperatur wird durch entsprechendes Beimischen des Vorlaufs zum Rücklauf (Rücklaufhochhaltung, Rücklaufanhebung) über eine hydraulische Beimischschaltung im Kesselkreis (geregeltes 3-Wege-Ventil) gewährleistet (siehe Kapitel 7.2). Gleichzeitig sind die vom Kesselhersteller vorgegebenen minimalen und maximalen Durchflussmengen einzuhalten, um eine vollständige und gleichmässige Durchströmung sicherzustellen und örtliche Überhitzungen zu vermeiden.

Bei Anlagen, die Brennstoffsortimente mit kritischen Schwefel- und Chlorgehalten einsetzen, kann es erforderlich sein, die Kessel-Eintrittstemperatur in Abhängigkeit von Schwefel-, Chlor- und Wassergehalt im Brennstoff auf > 80 °C bis 110 °C anzuheben, damit die Abgase im Kesselteil örtlich nicht unter den Säuretaupunkt abgekühlt werden und damit Korrosionsschäden vermieden werden können. In Anlagenkomponenten, deren Oberflächentemperaturen unter den Säuretaupunkttemperaturen der Abgase liegen (z. B. Economiser), sind die durch die Abgase angeströmten Flächen aus korrosionsfestem Material (korrosionsfestem Stahl) auszuführen. Korrosionsanfällig sind auch die ausgekühlten Flächen der Abscheideelektroden (Platten oder Innenrohre) von Elektropartikelabscheidern bei Schwachlastbetrieb des Holzkessels.

Wärmeerzeugungs- beziehungsweise Kesselanlagen sind sicherheitsrelevante Anlagenkomponenten und müssen über eine behördliche Bewilligung, entsprechende Typenzulassungen, Zertifizierungen und Abnahmeprüfzeugnisse verfügen und mit den entsprechenden Sicherheitseinrichtungen (z. B. Sicherheitstemperaturbegrenzer, Sicherheitsdruckbegrenzer, thermische Ablaufsicherung, Sicherheitsventil, Einrichtungen zum Betrieb ohne ständige Beaufsichtigung, Notstromversorgung usw.) ausgestattet sein. Es muss gewährleistet sein, dass in jedem Betriebszustand und auch bei Stromausfall ein unzulässiger Temperatur- oder Druckanstieg im Kessel oder im hydraulischen System der Wärmeerzeugung verhindert wird. Hierzu wird explizit auf die jeweils einzuhaltenden, gültigen nationalen Rechtsvorschriften verwiesen (siehe auch Kapitel 19).

Bei der Aufstellung des Kesselteiles ist darauf zu achten, dass Bedienungseinrichtungen zugänglich sind und der für die Bedienung und insbesondere für die Wartung (Reinigung) notwendige Platz zur Verfügung steht.

5.5 Automatische Kesselrohrreinigung

Während des Betriebs kommt es an den Kesselrohren, die mit den heissen Abgasen in Kontakt kommen, zu Verschmutzungen. Bei zunehmender Verschmutzung des Wärmeübertragers nimmt der Wärmeübergang ab und die Abgastemperatur nimmt zu, was sich negativ auf die Effizienz der Anlage auswirkt. Dies wird mit einer regelmässigen Kesselrohrreinigung verhindert. Automatische Reinigungssysteme entfernen Ablagerungen zum Beispiel durch pneumatische Druckluft-Impulse oder mechanische Verfahren bis hin zur Sprengreinigung mit Druckwellen. Die Sprengreinigung wird aber nur bei anlagenspezifischen Anforderungen im grossen Leistungsbereich eingesetzt.

Bei kleineren Feuerungsanlagen können bei geeigneter Bauweise die Rauchrohre manuell über geöffnete Wendekammertüren mit Bürsten gereinigt werden. Eine weitere Möglichkeit zur Entfernung von Ablagerungen an den Innenwänden der Kesselrohre ist das Auf- und Abbewegen der Stahlspiralen (Turbulatoren) in den Kesselrohren (von Hand oder elektrisch).

Bei Feuerungen > 200 kW mit hoher Volllastbetriebsstundenzahl kommt eine pneumatische Druckstossabreinigung zum Einsatz (siehe Bild 5.11). In regelmässigen Abständen werden Ablagerungen am Wärmeübertrager mit Druckluft-Impulsen entfernt. Damit kann der Jahresnutzungsgrad der Feuerungsanlage um rund 3 bis 4 % erhöht werden. Der Reinigungsaufwand ist gegenüber der manuellen Reinigung deutlich geringer. Die Betriebsdauer, bis wieder eine manuelle Reinigung erforderlich ist (Reisezeit), kann auf > 2’500 Vollbetriebsstunden erhöht werden.



Bild 5.11 Automatische Kesselrohrreinigung (Quelle: Schmid energy solutions).

5.6 Entstehung von Emissionen

Um eine möglichst emissionsarme Verbrennung zu gewährleisten, kommt der Auslegung und der Regelung der Feuerung eine entscheidende Bedeutung zu. Ziel ist eine möglichst **vollständige Verbrennung** des eingesetzten Brennstoffs. Dabei wird der im Brennstoff enthaltene Kohlenstoff mit dem Sauerstoff aus der zugeführten Luft oxidiert. Hauptprodukte dieser Reaktion sind Kohlendioxid (CO_2) und Wasserdampf (H_2O) (Tabelle 5.2).

Ein Nebenprodukt der vollständigen Verbrennung sind Stickoxide (NO_x, in technischen Verbrennungsprozessen vor allem NO und NO_2). Diese haben eine reizende Wirkung auf die Atemwege. Zudem begünstigen sie die Versäuerung des Ökosystems sowie die Bildung von bodennahem Ozon und sekundärem Feinstaub. Grundsätzlich kann zwischen drei Bildungswegen von NO_x unterschieden werden. Thermisches NO_x wird bei Temperaturen > 1'300 °C durch Reaktion von Luftsauerstoff mit Luftstickstoff gebildet. Promptes NO_x entsteht in vergleichsweise geringen Mengen vor allem bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe durch Anwesenheit von Kohlenwasserstoff-Radikalen. Die Bildung nimmt mit der Temperatur zu. Der übliche Temperaturbereich bei der Verbrennung von Biomasse liegt zwischen 800 °C und 1'200 °C. Aufgrund dieser niedrigen Temperaturen wird NO_x bei der Holzverbrennung praktisch ausschliesslich aus den im Brennstoff enthaltenen Stickstoffverbindungen gebildet. Die NO_x-Bildung kann durch eine Optimierung der Feuerraumgeometrie und der Regelung (Brennstoff- und Luftstufung) wesentlich reduziert werden (Kapitel 5.3).

Tabelle 5.2 Produkte aus der Verbrennung von Biomasse.

Bildungsmechanismus / Quelle	Produkt
vollständige Verbrennung	CO_2, H_2O
unvollständige Verbrennung	CO, Russ, unverbrannte C_xH_y
Nebenprodukte vollständiger Verbrennung	NO_x
Brennstoffverunreinigungen	SO_2, SO_3, H_2S, NO_x, Asche und Spurenelemente

Im Falle einer **unvollständigen Verbrennung** kommt es zu Emissionen von Kohlenmonoxid (CO), unverbrannten Kohlenwasserstoffen (C_xH_y), polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK), Teer, Russ, Ammoniak (NH_3) und Lachgas (N_2O). Staubförmige Emissionen werden anhand unterschiedlicher Korngrössen in zwei Fraktionen eingeteilt: Grobe Flugasche (> 1.0 µm) bezeichnet Partikel, die aus dem Brennstoffbett mitgerissen werden. Feinpartikel (0.01 bis 1.0 µm) entstehen hauptsächlich durch anorganische Bestandteile im Brennstoff, die während der Verbrennung verdampfen. Bei Abkühlung des Abgases kondensieren sie wieder und bilden Salze. Dabei entstehen Partikel im Grössenbereich um 0.1 µm. Bei naturbelassenem Holz mit geringem Rindenanteil entstehen so hauptsächlich Kaliumverbindungen (z. B. Kaliumsulfat K_2SO_4). Gelangen anorganische Brennstoffbestandteile direkt als feste Komponenten in den Abgasstrom, fungieren sie während der Abkühlung als Kristallisationskeime und können wachsen. Dabei entstehen Partikel im Grössenbereich um 1 µm. Auch hier handelt es sich um Salze, jedoch hauptsächlich um Calciumverbindungen (z. B. Calciumoxid CaO). Dieser Bildungspfad ist besonders bei Brennstoffen mit hohem Rindenanteil von Bedeutung (höherer Ca-Gehalt). Die Bildung von Staubemissionen aus Kohlenstoffpartikeln ist meist von untergeordneter Bedeutung, wenn die Verbrennungstemperatur 600 °C übersteigt und eine vollständige Verbrennung erzielt wird.

Weitere relevante Emissionen betreffen Schwefelverbindungen (Schwefeldioxid SO_2, Schwefeltrioxid SO_3, Schwefelwasserstoff H_2S), Salzsäure (HCl) sowie Dioxine und Furane (PCDD/F). Wegen des geringen Schwefel- und Chlorgehalts von naturbelassenem Holz sowie aufgrund der relativ hohen Einbindungsrate von Chlor und Schwefel in der Asche sind die SO_2- und HCl-Emissionen üblicherweise gering. Dioxine und Furane bilden sich in einem Temperaturbereich von 200 °C bis 500 °C auf der Oberfläche unverbrannter Flugaschepartikel (De-novo-Synthese). Bei der Verbrennung von naturbelassenem Holz in Anlagen, die dem Stand der Technik entsprechen, stellen PCDD/F-Emissionen normalerweise kein Problem dar. Sie können durch vollständige Verbrennung, die Reduktion der Aufwirbelung von Partikeln aus dem Glutbett sowie eine effiziente Staubabscheidung deutlich reduziert werden. Eine lange Verweilzeit im Temperaturbereich der De-novo-Synthese soll dennoch vermieden werden.

Während der Verbrennung werden anorganische Bestandteile und damit auch Spurenelemente (z. B. Schwermetalle) aus der Brennstoff-Matrix freigesetzt. Sowohl während der Verbrennung als auch auf dem Weg des Abgases zum Kamin verhalten sich die Elemente unterschiedlich, die einzelnen Spurenelemente zeigen eine unterschiedliche Flüchtigkeit. Ihre individuelle Verdampfungstemperatur führt dazu, dass sie an verschiedenen Stellen im Prozess verdampfen und wieder kondensieren. Elemente mit hohem Siedepunkt (Al, Cr, Fe, Mn, Si) sind wenig volatil und verbleiben deshalb grösstenteils in der Rostasche. Liegt der Siedepunkt etwas niedriger (As, Pb, Cd, Zn), verdampfen die Elemente im Verlauf der Verbrennung und kondensieren, absorbieren oder adsorbieren bei Abkühlung der Abgase an grober oder feiner Flugasche und werden damit aus dem Abgas abgeschieden. Elemente, die mit Sauerstoff reagieren oder einen sehr niedrigen Siedepunkt haben, gehen zuerst ins Abgas über (N, S, Hg). Sie werden in der Abgasreinigung gesondert behandelt (gezielte Entstickung, Entschwefelung) (Bild 5.12).

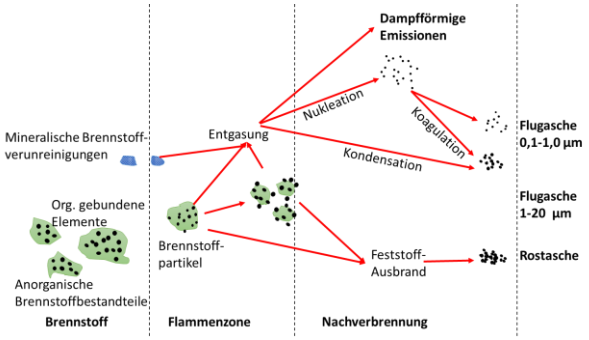


Bild 5.12 Verhalten von Spurenelementen im Brennstoff während und nach der Verbrennung.

5.7 Primärmassnahmen zur Emissionsminderung

Als Primärmassnahmen zur Minderung der Emissionen von Feuerungen werden sowohl konstruktive Massnahmen als auch eine geeignete Steuerung der Betriebsparameter bezeichnet. Durch Optimierung der oben aufgeführten Stufen des Verbrennungsprozesses können Emissionen aus unvollständiger Verbrennung weitgehend reduziert werden. Entscheidend sind in diesem Zusammenhang ein stabiles, hohes Brennstoffbett bei gleichzeitig guter Durchmischung von Brennstoff und Luft und eine ausreichend lange Verweildauer der Brenngase in hohen Temperaturbereichen (> 850 °C). Dabei spielt vor allem das Verhältnis von zugeführter Luft zu benötigter Luft (Luftüberschusszahl λ) eine wesentliche Rolle. Theoretisch wäre eine Luftüberschusszahl λ = 1 optimal, um eine (stöchiometrisch) vollständige Verbrennung zu erreichen. In der Praxis arbeitet man mit einer Gesamt-Luftüberschusszahl von 1.3 bis 1.8 bei Grossanlagen und 1.5 bis 2.0 bei kleinen und mittleren Anlagen, da dies eine optimale Durchmischung von Brennstoff, Abgas und zugeführter Luft ermöglicht. Eine Luftüberschusszahl λ < 1 führt zu unvollständiger Verbrennung, und nur ein Teil der im Brennstoff gespeicherten Energie wird als thermische Energie freigesetzt. Wird dem Verbrennungsprozess zu viel Luft zugeführt (λ >> 1), kommt es zur Abkühlung, was zu unvollständiger Verbrennung führt. Die Optimierung der Luftüberschusszahl kann durch geometrische Trennung der Feuerung in eine Primär- und eine Sekundärverbrennungszone realisiert werden. In der Primärverbrennungszone erfolgt die Trocknung und Pyrolyse/Entgasung des Brennstoffs bei unterstöchiometrischen Bedingungen (λ < 1) sowie die Oxidation der Holzkohle. In der Sekundärverbrennungszone erfolgt durch Zufuhr von Sekundärluft (λ > 1) die vollständige Oxidation der brennbaren Gase [54]. In modernen Feuerungen mit guten Regelungssystemen lässt sich die Konzentration unverbrannter Abgasbestandteile sehr effizient reduzieren. Die Primär- und Sekundär-Abgasrezirkulation (siehe Kapitel 5.3.2) wird ebenso zur Optimierung der Verbrennungsbedingungen und als Primärmassnahmen zur Emissionsminderung eingesetzt.

Eine geeignete Luftzufuhr zur Anlage ist auch für die Verringerung von Staubemissionen aus Festbettfeuerungen von grosser Bedeutung. Das Brennstoffbett sollte möglichst ruhig und stabil sein und gleichmässig von der Primärluft durchströmt werden, damit keine Partikel aufgewirbelt und mitgerissen werden. Dies führt allerdings zu einer geringen Durchmischung von brennbaren Gasen und Luft in der Primärverbrennungszone. Daher liegt der Fokus in der Sekundärverbrennungszone auf einer guten Durchmischung, um den notwendigen Gesamt-Luftüberschuss gering zu halten und den Anlagenwirkungsgrad zu erhöhen. Dies kann durch enge Kanalquerschnitte, in denen das brennbare Gas eine hohe Geschwindigkeit erreicht, realisiert werden. Die Sekundärluft wird über versetzt angeordnete Düsen ebenfalls mit hoher Geschwindigkeit eingebracht. Weitere Möglichkeiten sind eine wirbel- oder zyklonartige Sekundärbrennkammer. Insgesamt ist ein geringer Gesamt-Luftüberschuss anzustreben, der aber genügend hoch ist, um einen vollständigen Ausbrand zu ermöglichen.

Als Primärmassnahmen zur Stickoxidminderung stehen die Verfahren der Luftstufung und Brennstoffstufung zur Verfügung ([55], [56], [57], [58]) (Bild 5.13). Bei beiden Prozessen wird eine Reduktionszone erzeugt, in der die bei der Brennstoffzersetzung gebildeten Stickstoffverbindungen unter Sauerstoffmangel miteinander zu stabilem, unschädlichem molekularem Stickstoff reagieren, zum Beispiel nach der Reaktion:

$$NH_2 + NO \rightarrow N_2 + H_2O.$$

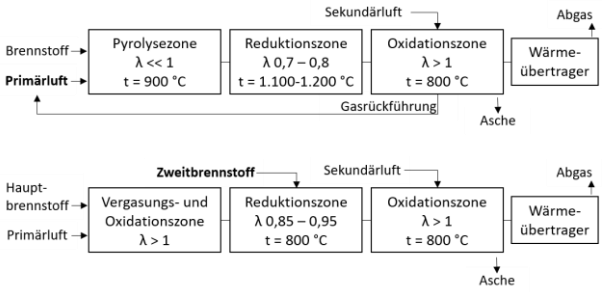


Bild 5.13 Prinzip der Luftstufung (oben) und Brennstoffstufung (unten) zur Reduktion von NOx.

Beide Verfahren sind nicht nachrüstbar. Für Neuanlagen > 200 kW wird Luftstufung eingesetzt. Für grössere Anlagen kann auch Brennstoffstufung eingesetzt werden. Die Verfahren weisen bei Brennstoffen mit niedrigem Stickstoffgehalt ein NO_x-Minderungspotenzial von rund 30 bis 50 % und bei Brennstoffen mit höherem Stickstoffgehalt von 50 bis 70 % auf ([55], [56]). Das Minderungspotenzial einer Brennstoffstufung liegt dabei etwas höher bei einem etwas breiteren Betriebsbereich der Feuerungsleistung [57].

Eine effektive Reduktion der Stickstoffverbindungen zu N_2 durch Luftstufung erfordert eine ausreichende Verweildauer der Brenngase in der Reduktionszone (mind. 0.3 s, λ = 0.7 - 0.8) bei hohen Temperaturen (1'100 °C bis 1'200 °C) ([55], [57]). Um dies zu erreichen, muss die Anlagentechnik auf die gestufte Verbrennung ausgelegt sein, und alle Betriebsparameter müssen exakt geregelt werden. Um eine Rückvermischung der Sekundärluft in die Primärverbrennungszone zu verhindern, ist eine kon-

struktive Trennung von Primär- und Sekundärverbrennungszone erforderlich. Der Einsatz von aschereichen oder Schlacke bildenden Brennstoffen ist aufgrund der hohen Temperaturen kritisch. Im Vergleich dazu erfordert die Brennstoffstufung eine etwas weniger genaue Einhaltung der Reaktionsbedingungen. Hier wird in einer zweiten Brennkammer ein Sekundärbrennstoff zugegeben, der sich schnell und gut mit den heissen Brenngasen (rund 800 °C) vermischt. Geeignet ist etwa Holzstaub. Ausgehend von einem geringen Mangel an Primärluft (λ = 0.85 bis 0.95) sorgt der zusätzliche Brennstoff für reduzierende Bedingungen. In beiden Fällen erfolgt die vollständige Verbrennung der Brenngase in einer nachgelagerten Oxidationszone bei Luftüberschuss.

5.8 Sekundärmassnahmen zur Emissionsminderung

5.8.1 Entstaubung

Zyklone werden für die Abscheidung von Grobstäuben eingesetzt. Bei grossen Volumenströmen wird ein **Multizyklon** eingesetzt. Ein Multizyklon ist eine Parallelschaltung von mehreren Einzelzyklonen, die in einem Gehäuse zusammengefasst sind. Ein Zyklon ist ein Fliehkraftabscheider. Das partikelbeladene Gas strömt entweder tangential (Bild 5.14 oder axial (Bild 5.15) in den zylindrischen Zyklonraum ein und wird dort in eine Rotationsströmung versetzt. Dabei werden Aschepartikel aus der Strömung an die Wand des Zyklonmantels geschleudert und von dort nach unten in Richtung Staubaustrag abgeschieden. Das gereinigte Gas verlässt den Zyklon über ein Tauchrohr.

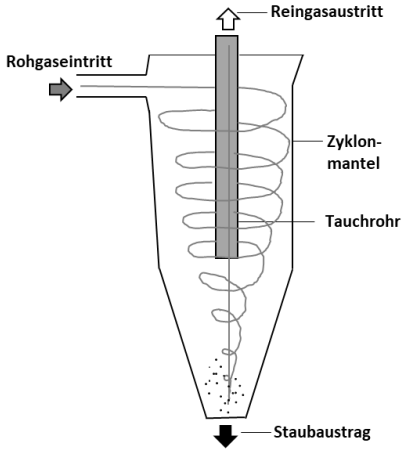


Bild 5.14 Schnitt durch einen Einzelzyklon (Tangentialabscheider).

Die Abscheidewirkung von Zyklonen in Holzfeuerungsanlagen beschränkt sich auf grobe Aschepartikel > 10 µm. In der Regel werden Reingaswerte von 120 - 200 mg/m³ (bei 11 Vol.-% O_2) erreicht [59]. Die Abscheideeffizienz hängt von der Umfangsgeschwindigkeit der Rotationsströmung und von der geometrischen Gestaltung des Zyklons ab. Je höher die Umfangsgeschwindigkeit ist, umso kleinere Partikel können abgeschieden werden. Mit zunehmender Geschwindigkeit steigt aber auch der Druckverlust. Bei reduzierter Feuerungsleistung sinkt dagegen die Abscheideeffizienz aufgrund der reduzierten Abgasgeschwindigkeit. Zudem können auch Partikel > 10 µm nicht immer zuverlässig abgeschieden werden, wenn sie eine sehr geringe Dichte aufweisen und die Fliehkraft damit zu gering ist.

Aufgrund des vergleichsweise geringen Platzbedarfes sowie geringer Investitions- und Betriebskosten ist der Zyklon das am häufigsten eingesetzte Staubabscheideverfahren in Holzheizungsanlagen. Ein alleiniger Einsatz reicht in der Regel aber nicht zur Einhaltung des Staubgrenzwertes aus. Deshalb werden Zyklone zur Grobstaub-Vorabscheidung für nachgelagerte Staubabscheideverfahren eingesetzt. Dies verringert die Staubfracht in nachgeschalteten Filtereinheiten, die dadurch effizienter arbeiten können. Bei nassen Abscheideverfahren können die Aufwendungen für Schlammbewirtschaftung und Entsorgungskosten reduziert werden.

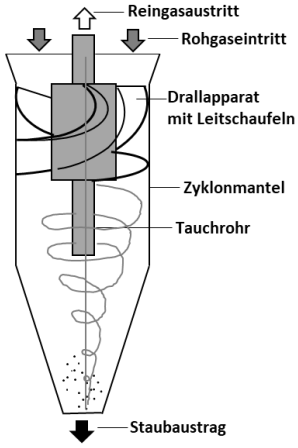


Bild 5.15 Schnitt durch einen Einzelzyklon (Axialabscheider).

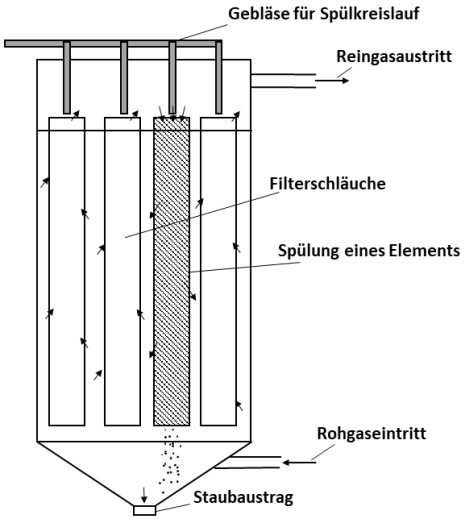


Bild 5.16 Schema eines Gewebefilters: Parallele Anordnung der Filterschlauch-Elemente. Jeweils drei Elemente sind in Arbeitsposition, das vierte Element wird im Gegenstrom-Prinzip gereinigt (Abreinigung mit Druckluft).

In einem **Gewebefilter** wird das staubbeladene Rohgas von aussen durch ein Filtermedium gesaugt, das meist auf einem zylindrischen Stützgewebe aufgebracht ist.

Auf dem Filtermedium bildet sich ein Filterkuchen, der periodisch im Gegenstrom zur Abgasströmung durch kurze Druckluftstösse abgereinigt wird (Bild 5.16, Bild 5.17).

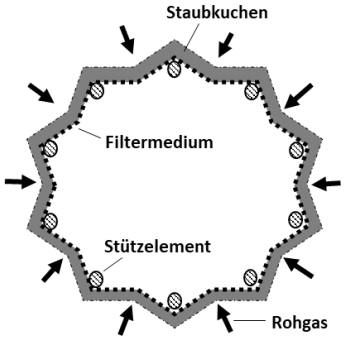


Bild 5.17 Schnitt durch einen Filterschlauch.

Gängige Filtermedien sind Nadelfilze, die je nach chemischer Zusammensetzung und Temperatur des Abgases oberflächenbehandelt werden (z. B. Teflon, PTFE-Laminat). Ein wichtiger Faktor im Betrieb ist die Abgastemperatur, da Abgaskondensation zu einer Verstopfung des Filters und zum vorzeitigen Wechsel des Filtermediums führen kann. Der Betriebsbereich liegt bei 180 bis 220 °C (maximale Abgastemperatur ungefähr 250 °C, minimale Abgastemperatur bei trockenem Brennstoff ab 140 °C). Kritisch ist ein hoher Wasserdampfgehalt im Abgas (z. B. bei feuchtem Brennstoff oder im Teil-/Schwachlastbetrieb). Zudem ist eine Funken- und Glutpartikelabscheidung nötig. Gewebefilter mit mittleren Investitions-, aber relativ hohen Betriebskosten werden im Leistungsbereich > 100 kW eingesetzt. Kompaktfiltereinheiten haben einen geringen Platzbedarf. Gewebefilter haben eine hohe Abscheideeffizienz. Es sind Reingaswerte von 1 bis 5 mg/m³ (bei 11 Vol.-% O_2) erreichbar [59]. Undichtheiten wie Haarrisse oder Löcher im Gewebe vermindern die Abscheideleistung drastisch. Durch die Zugabe von Absorptionsmitteln (Additiven) besteht die Möglichkeit einer zusätzlichen Abscheidung von HCl, SO_x und Dioxinen (PCDD/F).

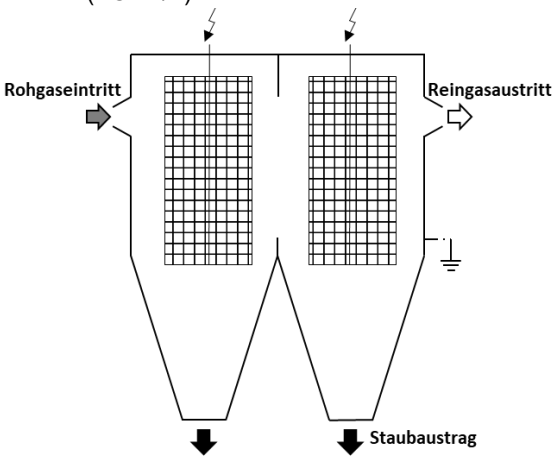


Bild 5.18 Schema eines Elektroabscheiders.

In einem **Elektroabscheider** erfolgt eine Partikelabscheidung aufgrund eines elektrischen Feldes. Umgangssprachlich wird auch der Begriff «Elektrofilter» verwendet, da die Abscheidung aber nicht durch Filtration erfolgt, wird im Folgenden der Begriff Elektroabscheider verwendet (Bild 5.18). Ein Elektroabscheider besteht aus einer an eine Spannungsquelle angeschlossenen Sprühelektrode und einer geerdeten Niederschlagselektrode. Gasmoleküle werden durch einen Elektronenstrom ionisiert und heften sich an die im Rohgas enthaltenen Partikel. Die so aufgeladenen Partikel lagern sich an der Niederschlagselektrode an und werden dort abgeschieden (Bild 5.19). Elektroabscheider können auch bei tiefen Leistungen eingesetzt werden. Die Abscheideeffizienz ist hoch, mit Reingasgehalten von 5 bis 50 mg/m³ (bei 11 Vol.-% O_2) bei hohem Platzbedarf und hohen Investitionskosten sowie mittleren Betriebskosten.

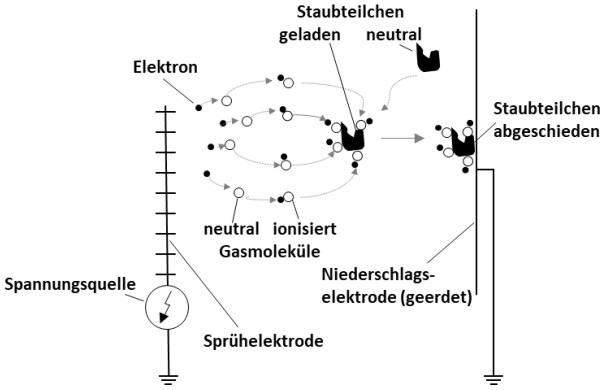


Bild 5.19 Physikalisches Wirkungsprinzip eines Elektroabscheiders.

Am häufigsten werden Trocken-Elektroabscheider eingesetzt. Die Konstruktion ist üblicherweise als Platten- oder Röhren-Elektroabscheider ausgeführt. Platten-Elektroabscheider, die mit Klopfeinrichtungen periodisch abgereinigt werden, sind heute als etablierte Technik ab 200 kW verfügbar. Der Raumbedarf ist hoch, die Höhe entspricht etwa dem vorgeschalteten Kessel. Eine Taupunktunterschreitung der Abgase muss sicher verhindert werden, solange die Hochspannung eingeschaltet ist. Zur Verminderung des Risikos von Kurzschlüssen sind die Isolatoren noch zusätzlich aus dem Gasstrom zurückversetzt und oft auch noch zusätzlich beheizt. Trotz dieser Massnahmen darf die Hochspannung erst eingeschaltet werden, wenn die Abgastemperatur zum Beispiel bei naturbelassenem Holz 80 °C und bei Altholz 130 °C erreicht hat. Unter diesem vom Hersteller vorgegebenen Grenzwert ist der Elektroabscheider unwirksam. Beim Anfahren und bei Minimallastbetrieb ist deshalb möglichst schnell ein stationärer Betrieb sicherzustellen. Dazu kann ein abgasseitiger Kesselbypass zum raschen Anheben der Abgastemperatur im Elektroabscheider eingesetzt werden. Bei Seriengeräten kann der Elektroabscheider direkt in den Kessel integriert werden. Röhren-Elektroabscheider werden für Holzheizungsanlagen bis etwa 5'000 kW angeboten. Darin sind mehrere Filterrohre mit innenliegenden Sprühelektroden angeordnet. Die Abreinigung der Rohrinnenwände (= Niederschlagselektrode) erfolgt durch mechanische Abreinigung mit Bürsten. Im Vergleich zum Platten-Elektroabscheider ist der Raumbedarf reduziert, es gelten aber die gleichen Forderungen bezüglich Taupunktunterschreitung.

Daneben gibt es auch **Nass-Elektroabscheider**, die in Kombination mit einer Abgaskondensation (siehe Kapitel 13.7.2.3) eingesetzt werden. Damit der Wasserdampf im Abgas auskondensiert, ist eine maximale Rücklauftemperatur < 45 °C erforderlich (bei trockenem Brennstoff noch tiefer). Während der Kondensation des Wasserdampfes werden die geladenen Staubpartikel als Kondensationskeime genutzt und, eingebunden in die Wassertropfen, als Kondensatschlamm abgeschieden. Der Abscheidegrad wird durch den Kondenswasseranteil erhöht und der Fremdwasserbedarf auf ein Minimum beschränkt. Zu beachten bleiben die Schlammaufbereitung und die Nachbehandlung des Wassers.

Im Rahmen von QM Holzheizwerke sollte zusätzlich eine jährliche **Mindestverfügbarkeit** der Staubabscheidung festgelegt und im Zuge der Betriebsoptimierung (Meilenstein 5) auch deren Einhaltung kontrolliert werden. Dies hat den Hintergrund, dass ein Elektroabscheider in Phasen mit relevanten Staubemissionen (Bild 5.20) aktiv sein soll.



Bild 5.20 Typischer Betriebszyklus einer Feuerung und eines Elektroabscheiders (siehe FAQ 38).

Anfahren, Heizbetrieb und Abfahren der Feuerung werden als Betriebsphase zusammengefasst, sie entsprechen der Feuerungsbetriebszeit. Die Abscheiderbetriebszeit darf nur gezählt werden, wenn der Elektroabscheider gleichzeitig mit der Feuerung in Betrieb ist (grün). Wenn der Elektroabscheider eine Einschaltverzögerung oder eine Störung aufweist, entsteht eine Ausfallzeit (rot). Wird der Elektroabscheider länger als die Feuerung betrieben, dann ist das eine Nachlaufzeit, welche nicht zur Betriebszeit gezählt werden darf. Während des Stillstands/Standbys der Feuerung sind die Staubemissionen signifikant tiefer als während des Betriebs der Feuerung. Mit der Nachlaufzeit des Elektroabscheiders können die Staubemissionen trotzdem weiter reduziert werden. Die Verfügbarkeit eines Elektroabscheiders wird in der Regel über ein Jahr bestimmt und ist definiert als das Verhältnis der aufsummierten Abscheiderbetriebszeit (grün) zur aufsummierten Feuerungsbetriebszeit (schwarz).

$$\text{Verfügbarkeit } [\%] = \frac{100 * \text{Abscheiderbetriebszeit}}{\text{Feuerungsbetriebszeit}}$$

Sowohl bei Elektroabscheidern als auch bei Gewebefiltern muss die vom Hersteller vorgeschriebene, vom Brennstoff abhängige Minimaltemperatur beim Anfahren möglichst schnell erreicht und im Minimallastbetrieb eine Temperaturunterschreitung vermieden werden. Auch die maximal zulässige Temperatur am Eintritt zum Abscheider/Filter muss beachtet werden. Einen grossen Einfluss darauf hat die Konfiguration und Betriebsweise der Anlage. Während beispielsweise holzverarbeitende Betriebe und Altholzverbrennungsanlagen häufig im Bandlastbetrieb arbeiten, sind im Bereich der Wärmeversorgung von Wohngebäuden mono- oder bivalente Holzheizwerke mit einem steigenden Anteil an Schwachlastbetrieb anzutreffen.

Hinweise zu Einbindung und Betriebsoptimierung (siehe auch Kapitel 16)

- Bei Anlagen mit zwei Holzkesseln ist die Lösung mit nur einem Partikelabscheider und einem Kamin nicht sinnvoll und wird nicht empfohlen. Jeden Kessel mit eigenem Partikelabscheider und eigenem Kamin auszustatten ist zwar teurer, ergibt aber Vorteile durch klare Kessellinien (keine gegenseitige abgasseitige Beeinflussung, optimaler Kaminquerschnitt, weniger Probleme im Teillastbetrieb usw.).
- Bei Abgastemperaturen > 120 °C ist zu prüfen, ob der Abgaswärmeübertrager (Economiser) vor oder nach dem Elektroabscheider beziehungsweise Gewebefilter eingebaut werden sollte. Bei tieferen Abgastemperaturen ist der Wärmeübertrager in jedem Fall nach dem Elektroabscheider anzuordnen, um eine Kondensation von Abgasbestandteilen im Elektroabscheider zu vermeiden.
- Wichtig ist, dass in einem kondensierenden Abgaswärmeübertrager abgasseitig die Wärmeaustauschflächen stets nass sein müssen. Nur so können unerwünschte Ablagerungen verhindert werden, welche sich in Zonen aufbauen können, die zwischen nass und trocken wechseln.
- Im Betriebsoptimierungskonzept muss immer unmissverständlich festgelegt werden, dass bei der automatischen Datenaufzeichnung «Partikelabscheider in Funktion» (d. h. Hochspannung eingeschaltet bzw. Bypass geschlossen bzw. Eindüsung Waschwasser eingeschaltet) aufgezeichnet wird und nicht etwa bloss ein Freigabesignal.

5.8.2 Entstickung

Für stickstoffreiche Brennstoffe wie Altholz, Spanplattenreste, naturbelassenes Hartholz oder Weichholz mit hohem Rindenanteil müssen Sekundärmassnahmen zur Reduktion von NO_x eingesetzt werden, um vorgeschriebene Emissionsgrenzwerte einzuhalten. Der Einsatzbereich wird in Kapitel 13.9.2 näher erläutert. Entstickungsmassnahmen sind nur schwer oder auch gar nicht nachrüstbar. Ihr Einsatz muss daher bei der Festlegung der Feuerungstechnologie und des Brennstoffsortiments von Anfang an mitgedacht und gegebenenfalls eingeplant werden.

Beim **SNCR-Verfahren (selective non-catalytic reduction)** wird ein Reduktionsmittel in eine Reduktionszone direkt im Brennraum eingedüst. Als Reduktionsmittel wird eine Ammoniak- (NH_3) oder Harnstofflösung (NH_2CONH_2) verwendet, die nicht ätzend und daher einfacher zu handhaben ist. Bei hohen Temperaturen bilden sich daraus NH_2-Radikale, die mit NO zu elementarem Stickstoff (N_2) reagieren. In der Reaktionszone ist eine gute Durchmischung erforderlich. Anzustreben ist eine Verweilzeit um 0.5 Sekunden in einem Temperaturbereich von 850 bis 950 °C. Zur Dosierung des Reduktions-

mittels ist eine NO_x-Messung im Abgas erforderlich (Molverhältnis n = NH_3/NO_x [mol/mol] = ca. 2). Der mittlere Entstickungsgrad beim SNCR-Verfahren beträgt 50 bis 75 %, unter optimalen Reaktionsbedingungen sind bis zu 95 % möglich [57]. Das Verfahren wird üblicherweise in Neuanlagen eingesetzt, kann abhängig von den individuellen Platzverhältnissen aber auch nachgerüstet werden. Es besteht auch die Option, Neuanlagen «SNCR-ready» zu bauen. Dabei wird die Feuerung bereits mit den für das SNCR-Verfahren notwendigen Komponenten (Reduktionszone, Öffnungen für Eindüsung, Platzreserven für Reduktionsmitteltank etc.) ausgerüstet. Sofern sich nach der Inbetriebnahme zeigt, dass eine Entstickung notwendig ist, kann rasch nachgerüstet werden.

Das SNCR-Verfahren erfordert eine präzise Regelung der Reaktionsbedingungen. Gut geeignet ist es bei Bandlastbetrieb und in Kombination mit einem Nasswäscher. Eine Eindüsung des Reduktionsmittels ausserhalb des oben genannten Temperaturfensters begünstigt die Entstehung stickstoffhaltiger Nebenprodukte wie Ammoniak, klimarelevantem Lachgas (N_2O), Cyanwasserstoff (HCN) und Isocyansäure (HNCO).

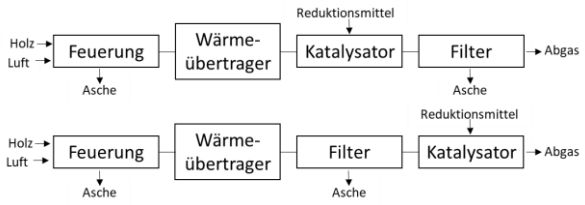


Bild 5.21 Selective Catalytic Reduction (SCR) high-dust-Verfahren (oben) und low-dust-Verfahren (unten).

Wird das Reduktionsmittel in Verbindung mit einem Katalysator eingesetzt, spricht man vom **SCR (selective catalytic reduction)**. Durch SCR ist ein Entstickungsgrad von über 95 % bei geringem Ammoniak-Schlupf möglich. Zum Abbau von möglichen Dioxinen wird ein integrierter Oxidationskatalysator empfohlen. Es ist eine NO_x-Messung und genaue Regelung des Mol-Verhältnisses (n = NH_3/NO_x [mol/mol] = ca. 1) erforderlich. Bei der Betriebsweise wird zwischen high-dust mit nachgeschalteter Staubabscheidung und low-dust mit vorgeschalteter Staubabscheidung unterschieden (Bild 5.21). Der Temperaturbereich liegt beim low-dust-Verfahren zwischen 200 und 250 °C, beim high-dust-Verfahren zwischen 250 und 450 °C. Hier wird ein nachgeschalteter Economiser zur Senkung der Abgastemperatur empfohlen. Beim high-dust-Verfahren ist eine Verstopfung des Katalysators durch Staubablagerungen möglich, es ist für Rest- und Altholz nur bedingt geeignet. Zudem besteht in beiden Fällen die Möglichkeit, dass Katalysatorgifte wie Arsen, Phosphor oder Alkalimetalle das katalytische Material deaktivieren [51]. Werden Katalysatorgifte zum Beispiel mit Staub bereits vor dem Eintritt der Abgase in den Katalysator abgeschieden, wird die Vergiftungsneigung reduziert und damit die Standzeit der Katalysatorelemente erhöht. Das high-dust-Verfahren wird von QM Holzheizwerke aufgrund der Problematik bezüglich Vergiftung und Verstopfung nicht empfohlen.

5.9 Wärmerückgewinnung mit Economiser und Abgaskondensation

Der Wirkungsgrad der Wärmeerzeugung kann erheblich erhöht werden, wenn die Abgase nach Austritt aus dem Kessel in zusätzlichen Wärmeübertragern weiter abgekühlt werden (Kapitel 13.7.2).

Ein **Economiser** ist ein zusätzlicher Wärmeübertrager zur Vorwärmung des Systemrücklaufs. Dort erfolgt eine Abkühlung der Abgase auf etwa 75 bis 80 °C (bis knapp über den Taupunkt). Beim Anfahren der Heizanlage oder bei Unterschreitung der Solltemperatur im Kamin wird ein Teil des heissen Abgasstroms über eine Klappe direkt in den Kamin geleitet, bis die Solltemperatur wieder erreicht ist. Aufgrund der grossen Effizienzsteigerungspotenziale sollte der Einsatz von Economisern im Rahmen der Projektierung eines Holzheizwerks in jedem Fall geprüft werden. Beispielsweise ergibt bei einer Luftüberschusszahl λ = 2 eine zusätzliche Abkühlung der Abgase um 10 K eine Erhöhung des feuerungstechnischen Wirkungsgrades in der Grössenordnung von 1 % [60]. Je nach Luftüberschusszahl und Wassergehalt kann eine Steigerung des Wirkungsgrades von 5 bis 7 % erreicht werden. Um den nötigen Luftüberschuss gering zu halten (λ < 1.8), ist eine gute Verbrennungsregelung notwendig.

Eine **Abgaskondensationsanlage** besteht in der Regel aus drei Stufen. Die Abgase, die den Kessel verlassen, durchlaufen zunächst einen Economiser, dann einen Kondensator (mit vorgeschaltetem Quench) und, bei Bedarf, einen nachgeschalteten Luftvorwärmer (Bild 5.22). Der Einsatzbereich liegt in der Regel bei Anlagen > 1 MW. Bei hohen Brennstoffkosten und langen Anlagenbetriebszeiten (Bandlastbetrieb) kommen auch kleinere Anlagen ab etwa 500 kW in Frage. Die mittlere Rücklauftemperatur der Wärmeabnehmer sollte tief und mindestens 10 °C unter dem Taupunkt der Abgase sein. Zu prüfen ist ein eigener Niedertemperaturrücklauf für den Kondensator.

Im Kondensator erfolgt eine weitere Abkühlung der Abgase bis unter den Taupunkt. Dadurch kondensiert ein Teil des im Abgas enthaltenen Wasserdampfes. Dabei werden grosse Energiemengen in Form von fühlbarer, aber vor allem latenter Wärme freigesetzt. Der Wassergehalt des Brennstoffs spielt eine wichtige Rolle; je mehr Wasser mit dem Brennstoff in den Prozess kommt, desto mehr Dampf kann wieder kondensieren. Je tiefer die Temperatur, auf die das Abgas abgekühlt werden kann, desto effektiver arbeitet die Abgaskondensationsanlage. Bei einer tiefen Gesamt-Luftüberschusszahl in der Verbrennung, hohem Wassergehalt im Brennstoff und niedriger Rücklauftemperatur des Heizkreises (< 40 °C) kann der Wirkungsgrad der Feuerungsanlage um bis zu 20 % gesteigert werden. Im Eintrittsbereich des Kondensators können abgasseitig Stellen auftreten, die je nach Betriebszustand abwechselnd nass oder trocken sind. Solche Stellen sind ablagerungs- und korrosionsgefährdet. Zur Vermeidung derartiger Probleme wird oft ein Quench

vorgeschaltet, der das Abgas befeuchtet und bis zum Taupunkt abkühlt. Erreicht das befeuchtete Abgas den Kondensator, erfolgt eine weitere Abkühlung und der Taupunkt wird unterschritten (Kondensat fällt aus). So lassen sich trockene Stellen im Kondensator vermeiden.

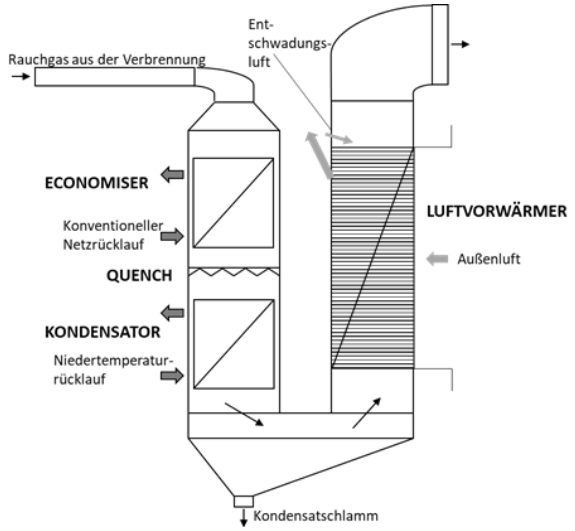


Bild 5.22 Schema einer Abgaskondensationsanlage.

Der anfallende Kondensatschlamm muss aufgrund der darin enthaltenen Schwermetalle von der Flüssigphase, dem Kondensat, abgetrennt, zum Beispiel in einem Sedimentationsbecken, und dann deponiert oder industriell aufbereitet werden. Diese Abtrennung sollte bei einem pH-Wert > 7.5 erfolgen, um eine Eluation von Schwermetallen in die Flüssigphase zu verhindern. Bei hoher Verbrennungsqualität (CO < 250 mg/m³ bei 11 Vol.-% O_2) und nach dem Einsatz einer Neutralisationsstufe (pH-Regelung) kann das überschüssige Kondensat nach der Schlammabtrennung unter Beachtung der lokalen Vorschriften in die Kanalisation eingeleitet werden.

In der Regel verfügen Anlagen zumindest über einen **Luftvorwärmer**, in dem das Abgas weitere Wärme an die Zuluft abgibt. Diese vorgewärmte Luft wird einerseits als Verbrennungsluft genutzt, andererseits wird sie dem abgekühlten Abgas beigemengt, um weitere Kondensation in den nachgelagerten Rohrleitungen und im Kamin sowie die Bildung von Wasserdampffahnen am Kamin zu reduzieren. Eine vollständige Entschwadung ist nicht zwingend erforderlich, da diese keinen weiteren technischen Nutzen, sondern nur einen optischen Effekt hat. Diese kann insbesondere für Holzheizwerke in touristischen und siedlungsnahen Gebieten wichtig sein.

Bei der Einbindung von Abgaswärmeübertragern ist auf die richtige Anordnung in Verbindung mit den Komponenten zur Abgasreinigung zu achten. Eine Abgaskondensationsanlage in Kombination mit einem Nass-Elektroabscheider erreicht einen Staubabscheidegrad inklusive Feinpartikeln von rund 95 %. Wird ein Trocken-Elektroabscheider oder ein Gewebefilter dem Economiser oder der Abgaskondensationsanlage vorgeschaltet, kann die Verschmutzung dieser Komponenten beträchtlich reduziert beziehungsweise die aufwendige Entsorgung des Kondensatschlammes des Nass-Elektroabscheiders verhindert werden.

5.10 Prozessleittechnik

5.10.1 Grundlagen

Der Begriff Prozessleittechnik wird in unterschiedlichen Anwendungsbereichen genutzt. Im Wesentlichen fasst die Leittechnik die gesamte Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik (MSR-Technik) und die damit verbundenen Datenströme einer Anlage zusammen (weiterführende Begriffsdefinitionen siehe [61]). Die Leittechnik dient zur Automatisierung des Anlagenbetriebes und beinhaltet alle dafür notwendigen Steuerungs-, Regelungs- und Überwachungsaufgaben. Die Integration geeigneter MSR-Systeme und Regelungskonzepte ist die Voraussetzung für einen effizienten, emissionsarmen und sicheren Anlagenbetrieb und daher ein wichtiger Bestandteil der Planung und Ausführung von Holzheizwerken. Dementsprechend hoch ist auch der Stellenwert im Rahmen von QM Holzheizwerke. Dieser Themenbereich wird in den Standard-Schaltungen ([62]) im Detail behandelt. Abgesehen von einigen Erläuterungen wird nicht auf die Grundlagen der Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik eingegangen (siehe hierzu beispielsweise [63]), sondern nur auf spezifische Themen, die in Bezug auf Planung, Bau und Betrieb von Holzheizwerken relevant sind.

Die Prozessleittechnik hat sich seit dem Bau der ersten Holzheizwerke signifikant weiterentwickelt. Eine umfassende MSR-technische Ausstattung, die einen vollautomatischen Anlagenbetrieb ermöglicht, ist Stand der Technik. Auch Kleinkessel aus der Serienproduktion sind heutzutage mit einem vollautomatischen Regelungssystem und einer digitalen Benutzeroberfläche ausgestattet.

Begriffe

Unter einer **Regelung** versteht man einen Vorgang, bei dem eine einzustellende Grösse (Regelgrösse) fortlaufend gemessen und mit einer Führungsgrösse (Sollwert) verglichen wird. Mit dem Vergleichsergebnis wird die Regelgrösse so beeinflusst, dass sich die Regelgrösse der Führungsgrösse angleicht. Der sich ergebende Wirkungsablauf findet in einem geschlossenen Regelkreis statt. Demgegenüber stellt eine **Steuerung** eine offene Wirkungskette (Steuerkette) dar, bei der die einzustellende Grösse in Abhängigkeit der wichtigsten Einflussgrösse (Störgrösse) beeinflusst (gesteuert) wird, ohne die einzustellende Grösse zu messen. Der tatsächlich erreichte Ist-Wert der einzustellenden Grösse wird somit nicht überprüft und hat keinen Einfluss auf die Steuerkette (siehe [63]).

Die wesentliche Aufgabe der **Messtechnik** ist es, mit entsprechenden Messgeräten (Sensoren) technische Vorgänge quantitativ zu erfassen und mit den gemessenen Grössen die Grundlage zur Steuerung und Regelung von Prozessen zu liefern (weiterführende Literatur siehe [64]).

Gemäss EN 61131 – Teil 1 [65] ist eine **speicherprogrammierbare Steuerung (SPS)** ein digital arbeitendes elektronisches System für den Einsatz in industriellen Umgebungen mit einem programmierbaren Speicher zur internen Speicherung der anwenderorientierten Steuerungsanweisungen zur Implementierung spezifischer Funktionen wie zum Beispiel Verknüpfungssteuerung, Ablaufsteuerung, Zeit-, Zähl- und arithmetische Funktionen, um durch digitale oder analoge Eingangs- und Ausgangssignale verschiedene Arten von Maschinen und Prozessen zu steuern.

Die Prozessleittechnik eines Holzheizwerkes muss die folgenden grundlegenden Aufgaben erfüllen:

- Vollautomatische Steuerung und Regelung der gesamten Anlage ohne Erfordernis regelmässiger manueller Eingriffe sowie, wenn möglich, ohne die ständige Anwesenheit von Betriebspersonal
- Gewährleistung eines sicheren Anlagenbetriebes in jedem Betriebszustand (Personen- und Anlagenschutz)
- Sicherstellung der Wärmeversorgung der Wärmeabnehmer
- Ermöglichen eines optimalen Anlagenbetriebs in jedem Betriebszustand
- Bedienung und Überwachung der Anlage (Anlagenvisualisierung/Darstellung des aktuellen Betriebszustandes, Einstellen von Sollwerten und Regelungsparametern, Ein-/Ausschalten von Anlagenkomponenten usw.)
- Fernzugriff und Störungsmeldungen
- Erfassung, Verarbeitung und dauerhafte Speicherung aller relevanten Betriebsdaten (Messdaten), Aufbereitung und Visualisierung von (historischen) Messdatentrends
- Erfassung und dauerhafte Speicherung aller abrechnungsrelevanten Daten (Kundenverbräuche!)
- Bei Bedarf Ermöglichung eines manuellen Betriebes und eines Notbetriebes der Anlage

Der Anlagenbetrieb während An- und Abfahrvorgängen sowie besonderen oder unvorhergesehenen Betriebszuständen (Wartung, Reinigung und kleinere Reparaturen bei laufendem Betrieb, Ausfall einzelner Komponenten, Testläufe, Notbetrieb, extreme Lastzustände) erfolgt meist manuell durch das Betriebspersonal (Handbetrieb) oder im teilautomatischen Betrieb.

Bei Wärmeerzeugungsanlagen mit moderatem Druck und Temperaturen (z. B. Warmwassersysteme < 110 °C) ist in der Regel keine ständige Anwesenheit von Betriebspersonal erforderlich. Bei Heisswasser- und Dampfanlagen kann eine ständige Anwesenheit erforderlich sein, oder es ist eine zusätzliche sicherheitstechnische Ausstattung für einen Betrieb ohne menschlichen Eingriff (BOME) [66] beziehungsweise ohne ständige Beaufsichtigung (BOSB) erforderlich. Für den Betrieb ohne ständige Beaufsichtigung sind jedenfalls die jeweiligen nationalen Vorschriften und Richtlinien zu prüfen und einzuhalten (siehe Kapitel 19).

Das Prozessleitsystem besteht aus mehreren Ebenen, die unterschiedliche Aufgaben erfüllen (Bild 5.23).

Funktionsbezogene Unterteilung und technische Ausführung

Das Prozessleitsystem kann entsprechend den zu erfüllenden Aufgaben in eine **Bedienungsebene**, ein **untergeordnetes MSR-System** (z. B. für die Regelung einzelner Komponenten) und ein **übergeordnetes MSR-System** (Aufgaben bezogen auf die Gesamtanlage) unterteilt werden. Diese funktionsbezogene Unterteilung hilft bei der Definition des Regelungskonzeptes und einzelnen Regelungsaufgaben sowie der Erstellung der Funktionsbeschreibung.

Diese drei Ebenen stellen jedoch nicht gleichzeitig die physischen Grenzen der einzelnen technischen Komponenten (Regelungseinheiten) oder Liefergrenzen dar. Die **technische Ausführung des Prozessleitsystems** hängt von verschiedenen Faktoren ab und muss nicht analog zu den drei Funktionsebenen strukturiert sein. Beispielsweise können die Bedienungsebene sowie das unter- und übergeordnete MSR-System fallweise mit einer einzelnen SPS realisiert werden, oder aber auch aus drei getrennten Einheiten unterschiedlicher Hersteller bestehen (die über Schnittstellen miteinander verbunden sind).

Die funktionsbezogene Benennung als über- und untergeordnetes MSR-System ist bei MSR-Technikern nicht immer gebräuchlich, da man sich hier eher an physischen Komponenten oder Liefergrenzen orientiert oder eventuell andere Bezeichnungen verwendet werden (z. B. Master-System).

Die **Bedienungsebene** wird über einen Leitrechner (Heizwerksrechner) oder ein Bedienfeld (Display) am Schaltschrank realisiert. Die Bedienungsebene verfügt

über Schnittstellen zu den über- und untergeordneten MSR-Systemen und ermöglicht eine vollständige Bedienung der Anlage. Hier können zumeist mit Hilfe einer Anlagenvisualisierung der laufende Betrieb der Anlage und die aktuellen Betriebsdaten überwacht und Sollwerte, Zeitprogramme und Ähnliches eingestellt werden. Bei höherer Berechtigungsstufe (z. B. Servicetechniker, Hersteller) können auch detaillierte Regelungseinstellungen erfolgen. Über den Leitrechner oder direkt am Schaltschrank erfolgt die Wahl des Anlagenbetriebes (z. B. Automatik, teilautomatischer Betrieb, Handbetrieb usw.). Über die Bedienungsebene können alle wesentlichen Anlagenkomponenten auch manuell geschaltet werden. Über Bedienelemente am Schaltschrank kann unabhängig vom Leitrechner auch ein manueller Notbetrieb der Anlage erfolgen.

Das **übergeordnete MSR-System** ist für alle übergeordneten Steuer- und Regelfunktionen wie beispielsweise die Koordination und das Lastmanagement der einzelnen Wärmeerzeuger (Leistungssignal für Kessel) und das Speichermanagement sowie oft auch für die Regelung der Heizhaushydraulik (Pumpen, Armaturen im Heizhaus) und der Netzpumpen des Wärmenetzes (siehe auch Kapitel 8) zuständig. Das übergeordnete System verfügt über Schnittstellen zu den untergeordneten MSR-Systemen der einzelnen Anlagenkomponenten und verknüpft diese miteinander. Oft wird auch die Datenaufzeichnung über das übergeordnete MSR-System realisiert (siehe Kapitel 5.10.2).

Untergeordnete MSR-Systeme dienen zur spezifischen Steuerung und Regelung einzelner Funktionsgruppen der Anlage. Eine Funktionsgruppe ist beispielsweise ein Holzkessel mit allen zugehörigen Antrieben, Aggregaten, Armaturen oder analog dazu die Funktionsgruppe Öl-/Gaskessel, Partikelabscheider, Abgaskondensationsanlagen, Wasseraufbereitung und andere. Diese untergeordneten MSR-Systeme werden in der Regel von den Herstellern der jeweiligen Komponente mitgeliefert und je nach Komponente als einfache autonome Regler (z. B. für eine Wasseraufbereitungsanlage) bis hin zu einer komplexen SPS für einen Holzkessel ausgeführt. Diese MSR-Systeme übernehmen den gesicherten Betrieb und die detaillierten Steuerungs- und Regelungsaufgaben der Einzelkomponenten. Für den Holzkessel sind dies beispielsweise die Brennstoffzufuhr zur Feuerung und die Brennstoffbetthöhe am Rost, die Rostgeschwindigkeiten, die Drehzahlen der Verbrennungsluft- und Abgasventilatoren (Unterdruckregelung), die Abgasrezirkulation und die Feuerraumtemperatur, die Steuerung der Entaschung, die Feuerungsleistung, die Kesselvorlauftemperatur, sicherheitsrelevante Steuer- und Regelungsaufgaben und vieles mehr. Die MSR-Systeme der Hauptkomponenten müssen über eine Schnittstelle und Kommunikationsmöglichkeit mit dem übergeordneten MSR-System und der Bedienungsebene (Leitrechner) verfügen, um beispielsweise übergeordnete Leistungs- und andere Sollwertvorgaben verarbeiten zu können und eine lückenlose Anlagenvisualisierung und Datenaufzeichnung sicherzustellen. Es wird empfohlen, möglichst auch alle Hilfssysteme zumindest mit einem Betriebs- und Störsignal und gegebenenfalls den wichtigsten Betriebsparametern in das übergeordnete MSR-System einzubinden. Die Regler der einzelnen Hausübergabestationen eines Wärmenetzes sind ebenso als untergeordnete MSR-Systeme zu betrachten, die grundsätzlich autonom funktionieren, aber dem Stand der Technik entsprechend auch über eine Anbindung an ein zentrales übergeordnetes MSR-System, eine Fernzugriffsmöglichkeit und eine zentrale Datenerfassung verfügen (siehe Kapitel 8.5).

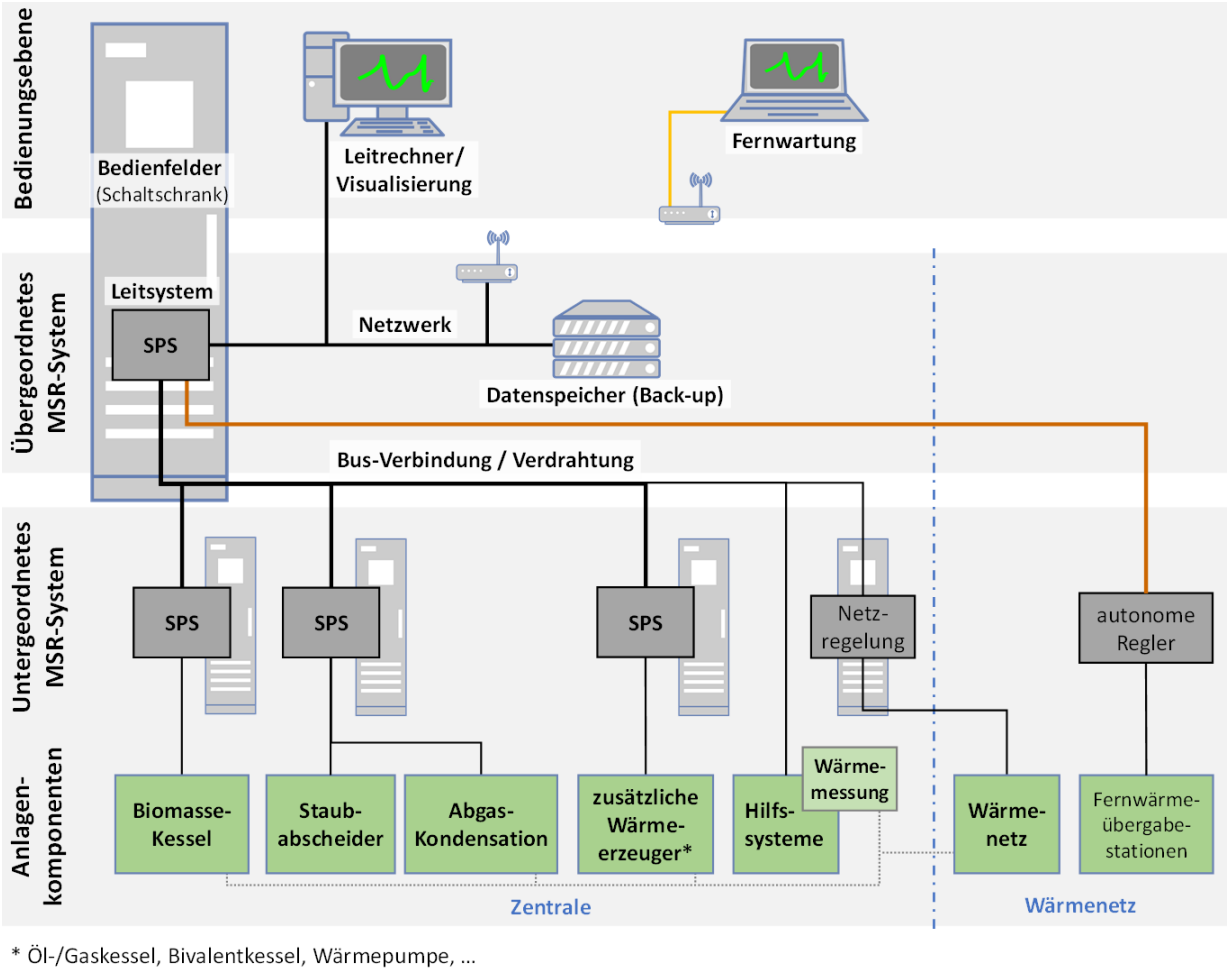


Bild 5.23 Funktionsbezogene Unterteilung eines Prozessleitsystems in Bedienungsebene, übergeordnetes MSR-System und untergeordnete MSR-Systeme (Beispiel für ein Holzheizwerk mit Wärmenetz).

Technische Ausführung

Das Prozessleitsystem und die zuvor genannten Ebenen können auf verschiedene Weise realisiert werden (siehe auch Tabelle 6 in den QM Holzheizwerke Standard-Schaltungen – Teil I [62]). Bei Kleinanlagen können oft alle drei Ebenen vom MSR-System des Holzkessels übernommen werden, da es zumeist keine weiteren untergeordneten MSR-Systeme gibt und moderne Holzkessel auch als Seriengerät bereits über die Möglichkeit verfügen, Heizkreise, Speicherladekreise oder beispielsweise eine Solaranlage mitzuregeln. Hier erfolgt die Bedienung direkt über das Bedienfeld des Holzkessels und ohne Leitrechner. Für eine Datenaufzeichnung werden in der Regel zusätzliche Einrichtungen benötigt.

Bei grösseren Objekten mit einem Gebäudeleitsystem werden Holzkessel als untergeordnete MSR-Systeme in die Gebäudeleittechnik (übergeordnetes MSR-System) und die dort integrierte Bedienungsebene eingebunden, welche auch für die Datenerfassung zuständig ist. Bei grösseren Holzheizwerken kann je nach Ausführung entweder die SPS des/der Holzkessel auch die Aufgabe der übergeordneten Regelung übernehmen (z. B. mit einer erweiterten Programmierung und Einbindung anderer Anlagenteile), oder es gibt ein eigenes SPS-basiertes übergeordnetes Regelsystem. Alternativ dazu können auch übergeordnete Regelungsaufgaben auf verschiedene Regler oder Hersteller aufgeteilt sein (z. B. Speicherregelung und Heizhaushydraulik durch SPS des Holzkessels und Netzregelung mit eigener Einheit des Herstellers der Wärmeübergabestation).

Die Struktur des Prozessleitsystems und allenfalls auch die Aufteilung der Regelungsfunktionen auf unterschiedliche Regler/SPS ist jedenfalls im Zuge der Planung im Detail zu definieren und in der weiterführenden Ausschreibung und Errichtung der Anlage entsprechend zu berücksichtigen.

Der Aufbau des MSR-Systems und das Regelungskonzept sind wichtige integrale Bestandteile von QM Holzheizwerke und werden in den Standard-Schaltungen von QM Holzheizwerke [62] und im Kapitel 7 «Hydraulik der Wärmeerzeugung» im Detail erläutert.

5.10.2 Anforderungen an die messtechnische Ausstattung und Datenerfassung

Eine umfassende messtechnische Ausstattung des Heizwerkes und des Wärmenetzes und eine geeignete

Leittechnik für die Übertragung, Speicherung und Visualisierung der gemessenen Betriebsdaten sind Stand der Technik moderner Holzheizwerke. Dies ist eine wichtige Grundlage für eine gewissenhafte Betriebsführung und für die Durchführung einer umfassenden Betriebsoptimierung (siehe Kapitel 16). Eine umfassende und langjährige Datenerfassung stellt ein wichtiges Kapital an Know-how dar, das neben der laufenden Betriebsführung und Optimierung auch von grossem Wert für die Planung zukünftiger Anlagenerweiterungen sowie die Modernisierung und Erneuerung von Anlagen ist (siehe Kapitel 18). Als Hilfestellung für die Planung und Ausführung der Datenerfassung stellt QM Holzheizwerke in Kombination mit den Standard-Schaltungen eine umfassende Messstellenliste (siehe [62]) sowie Empfehlungen zur Darstellung und Beurteilung von Betriebsdaten zur Verfügung (siehe FAQ 8).

Das Datenerfassungssystem und die Visualisierung (am PC in der Leitwarte – siehe Bild 5.24) müssen unter anderem die folgenden Mindestanforderungen erfüllen:

- Automatische Erfassung und Speicherung aller Messwerte in hoher zeitlicher Auflösung (Empfehlung QM Holzheizwerke [62]: Messintervall von 10 s und ein Aufzeichnungsintervall von 5-Minuten-Mittelwerten empfohlen)
- Visualisierung der Anlage mit grafischen Anlagenschaubildern, welche die wichtigsten Betriebsparameter und Betriebszustände der Einzelkomponenten beinhalten (Momentanwerte)
- Grafische Darstellung der zeitlichen Verläufe (Trends) in Form von konfigurierbaren Diagrammen und Parametern
- Benutzerfreundliche Exportmöglichkeit für alle gemessenen, berechneten und gespeicherten Betriebsdaten in einem allgemein lesbaren Datenformat (z. B. textbasierte Dateien im .csv-Format)
- Regelmässiges Back-up aller Betriebsdaten auf einem unabhängigen System

Durch eine Datenkommunikation im Fernwärmenetz sollten auch die Betriebsdaten der Fernwärme-Übergabestationen in die Leittechnik und Datenaufzeichnung eingebunden werden (siehe Kapitel 8.5). In Bezug auf die Fernauslesung von Kundendaten sind die jeweils gültigen Datenschutzrichtlinien einzuhalten. Es wird empfohlen, das Thema Fernzugriff und Datenfernauslesung in den Wärmeliefervertrag aufzunehmen bzw. mit Bestandskunden eine nachträgliche Vereinbarung zu treffen.

Für eine erleichterte Betriebsführung und Anlagenüberwachung verfügen moderne Holzheizwerke auch über eine Fernzugriffsmöglichkeit auf die Visualisierung und Regelung für das Betriebspersonal. Diese Möglichkeit sollte auch für Planerinnen und Planer und ausgewählte Hersteller vorgesehen werden, um bei Bedarf einen raschen Zugriff auf aktuelle Anlagendaten zu ermöglichen. Wenn mehrere Personen/Unternehmen über einen entsprechenden Fernzugriff verfügen, müssen die Verantwortlichkeiten und Kompetenzen genau festgelegt (allenfalls mit eingeschränkten Berechtigungen) und jede Änderung (z. B. Verstellung von Sollwerten oder Regelungsparametern) dokumentiert und kommuniziert werden.

5.10.3 Planung und Ausführung

Die Planung der Leittechnik muss im allgemeinen Planungsprozess berücksichtigt werden. Hier sind insbesondere zu einem frühen Zeitpunkt von der Hauptplanerin oder dem Hauptplaner der Aufbau und die Struktur des Leittechniksystems (siehe Kapitel 5.10.1) und die davon abgeleiteten Zuständigkeiten zu definieren und in weiterer Folge in den Leistungsverzeichnissen der Ausschreibungen und Beauftragungen entsprechend zu berücksichtigen.

Im Zuge der Planung muss eine umfassende Funktionsbeschreibung erstellt werden. Diese ist unter anderem Basis für die Detailplanung und Ausführung (insbesondere hydraulische Verschaltung und Regelung), aber auch grundlegend notwendige Voraussetzung für eine erfolgreiche Betriebsoptimierung.



Bild 5.24 Leitwarte eines Holzheizkraftwerkes (Quelle: AEE INTEC).

Die Funktionsbeschreibungen definieren die Grundprinzipien des jeweiligen Regelkonzepts mit Fokus auf die übergeordnete Regelung (Lastmanagement, Speicherbewirtschaftung, Hydraulik Heizzentrale, Wärmenetz). Die detaillierte Programmierung und Realisierung des Regelkonzepts ist Aufgabe der MSR-Techniker der Hersteller oder Lieferanten. Beispielsweise ist die Ausführung des untergeordneten MSR-Systems für die Holzkessel zumeist im Lieferumfang für den Kessel enthalten. Der Hauptplanerin oder dem Hauptplaner obliegt es, die Einhaltung der grundlegenden Anforderungen an die MSR-Systeme und an die Datenerfassung entsprechend Funktionsbeschreibung und Leistungsverzeichnissen zu überprüfen.

Die Funktionsbeschreibung umfasst die folgenden wesentlichen Bestandteile:

- Detaillierte Beschreibung der Funktionsweise der Anlage für alle relevanten Betriebszustände (inkl. Regelungsbeschreibung)
- Übersicht der wichtigsten und im Betrieb anpassbaren Regelparameter
- Vollständige und mit dem Hydraulikschema übereinstimmende Messstellenliste. Je Messstelle muss die Messposition, der Messbereich, die zeitliche Auflösung und die Messgenauigkeit angegeben werden (siehe Kapitel 16).
- Beschreibung der automatischen Datenaufzeichnung (Grundprinzip und Daten- bzw. Dateistruktur, Ort und Dauer der Datenspeicherung usw.)

Bei der Ausführung der Leittechnik ist insbesondere auf die nachfolgenden Punkte zu achten (siehe auch Muster-Ausschreibung Holzkessel von QM Holzheizwerke):

- Staubgeschützter Aufstellungsort und Sicherstellung, dass die maximale Betriebstemperatur der Elektronikbauteile nicht überschritten wird. Bei hohen internen Wärmelasten (z. B. durch Frequenzumformer) ist eine Lüftung/Klimatisierung vorzusehen.
- Platzreserve von rund 20 % in den Schaltschränken oder für zusätzliche Schaltschränke (Anlagenerweiterung) vorsehen.
- Bestmögliche Standardisierung der eingesetzten Komponenten (z. B. Normschaltschränke, soweit möglich einheitliche Sensoren usw.).
- Sicherstellung der Kompatibilität der verwendeten Bauteile und Systeme sowie einer Kommunikation zwischen allen Ebenen und Systemteilen.
- Gewährleistung einer langfristigen Verfügbarkeit von Ersatzteilen.
- Definition von klaren Verantwortlichkeiten und eindeutigen Liefergrenzen und Schnittstellen.
- Einhaltung aller relevanten Vorschriften, Normen und Richtlinien.
- Umfassende technische Dokumentation inklusive Schaltplänen, Datenblättern und Datenpunktlisten (ins Leistungsverzeichnis der Ausschreibungen integrieren).
- Eindeutige und fachgerechte Beschriftung von Feldgeräten und Verkabelung.
- Alle Störmeldungen der Einzelkomponenten müssen über potenzialfreie Kontakte an die übergeordnete SPS weitergeleitet werden.
- Mit Klartext beschriftete Handschaltebene zur manuellen Ansteuerung der wesentlichsten (sicherheitsrelevanten) Anlagenkomponenten. Die Handschaltebene ist mit einer Verriegelung zu versehen.
- Fernzugriffsmöglichkeit und Weiterleitung von Störmeldungen.
- Möglichkeit der Vergabe von spezifischen Zugriffs- und Benutzerberechtigungen.
- Benutzergerechte und einfach verständliche Anleitungen und Beschreibungen für das Bedienpersonal.

6 Komponenten von Brennstofflagerung, -förderung und Entaschung

6.1 Vorbemerkung

In diesem Kapitel werden die Komponenten der Brennstofflagerung, -förderung und der Entaschung beschrieben. Die geeignete Auswahl und Dimensionierung dieser Komponenten sind in Kapitel 14 beschrieben.

In Kapitel 19 sind die länderspezifischen Anforderungen an die Sicherheitseinrichtungen der entsprechenden Komponenten bezüglich Brandschutz, Explosionsschutz (ATEX, BGI Informationen 739-2) und Unfallverhütung aufgeführt (Lichtschranken, Abschaltsicherungen, Zutrittssicherungen, Absturzsicherungen, Gärgasabsaugung usw.).

6.2 Brennstofflagerung

Brennstoffsilos mit Brennstoffaustragungssystem
Brennstoffsilos sind geeignet für trockene bis sehr feuchte Hackschnitzel und Briketts mit begrenzter Beimischung von Spänen und Staub. Sie sind durch Abkippen des Brennstoffs vom Lastwagen einfach zu befüllen. Da sie in der Regel als Unterflursilos (Bild 6.1) ausgeführt sind, ist das Lagervolumen teuer (Erdarbeiten und Stahlbeton). Die Brennstoffsilos verfügen über ein automatisches Austragungssystem (siehe Kapitel 14.3), welches den eingelagerten Brennstoff aus dem Silo fördert.



Bild 6.1 Unterflursilo (Quelle: Andres Jenni).

Mobiles Containersystem mit Austragung
Die Befüllung des mobilen Containersystems (Bild 6.2) mit Hackschnitzeln erfolgt in der Regel im Wald oder durch den Brennstofflieferanten auf dessen Betriebsgelände.

Der befüllte Container (Füllvolumen rund 30 m^3) wird mit dem LKW angeliefert und abgesetzt. Das im Container eingebaute Austragungssystem wird mit der stationären Beschickungsvorrichtung der Feuerung gekoppelt. Das Feuerungssystem steuert die Brennstoffaustragung des Containers an. Ein zweiter voller Container steht als Reserve bereit, damit bei Bedarf sofort umgestellt werden kann und die kontinuierliche Brennstoffzufuhr nicht unterbrochen wird. Je nach Nennleistung des Heizwerkes sind mehrere Container notwendig. Eine kontinuierliche Hackschnitzelanlieferung in Containern ist Bedingung. Die Container können auch gemietet werden.

Geeignet sind mobile Hackschnitzelcontainer mit Austragung für Holzhackschnitzel, Rinde zerkleinert und Sägespäne. Die Austragungstechnologie ist bis zu einem gewissen Mass unempfindlich gegenüber Brennstoffteilen mit Übergrösse und Steinen. Sie kann als Ersatz oder Alternative für stationäre (immobile) Brennstoffsilos dienen.

Vorteile sind, dass es keine Investitionen für ein stationäres Silo gibt und dass die Abladezeiten bei der Hackschnitzellieferung kurz sind.

Dagegen steht als Nachteil die Abhängigkeit vom Brennstofflieferanten. Ausserdem werden Lagerflächen ausserhalb des Heizsystems benötigt. Besonders im Winter erweist sich ein einfacher Sichtschutz der Container als vorteilhaft (Windschutz). Durch die Mietkosten für die Container sind die Betriebskosten relativ hoch. Im Winter besteht teilweise Einfriergefahr.



Bild 6.2 Mobile Hackschnitzelcontainer mit Austragung als Siloersatz (Quelle: Holzenergie Schweiz).

Oberirdische Rundsilos
Oberirdisch angeordnete Rundsilos (Bild 6.3) sind geeignet für Brennstoffe mit einer Stückigkeit bis P63, einer maximalen Partikellänge von 200 mm und einem Wassergehalt von trocken bis > 55 %. Das Einsatzgebiet sind grosse Holzheizwerke mit kurzen Umschlagszeiten des Brennstoffes im Silo. Dadurch wird Brückenbildung vermieden.

Die Befüllung erfolgt in der Regel über Kratzkettenförderer und ein Verteilsystem oberhalb des Rundsilos.

Die Austragung erfolgt mittels Frässchnecke (siehe Kapitel 6.4.1).



Bild 6.3 Rundsilo (Quelle: Gottwald GmbH Maschinenbau).

Spänesilos
Spänesilos (Bild 6.4) sind für Holzspäne, Sägemehl und Schleifstaub aus holzverarbeitenden Betrieben, aber auch für trockene Holzhackschnitzel und Briketts geeignet. Die Befüllung erfolgt in der Regel pneumatisch. Die Anforderungen an die Sicherheitseinrichtungen bezüglich Explosionsschutz (ATEX) sind besonders zu beachten (siehe Kapitel 19, Vorschriften für Spänesilos).



Bild 6.4 Spänesilo (Quelle: Holzenergie Schweiz).

Pelletlager
Holzpellets werden in geschlossenen und trockenen Lagerräumen oder Behältnissen gelagert. Montagefertig lieferbar sind Stahl-, Kunststoff- oder Gewebetanks. Die Befüllung erfolgt meist pneumatisch, bei grösseren Unterflursilos vereinzelt auch durch Abkippen. Die Austragung geschieht bei kleinen Lagern mittels Förderschnecken oder pneumatisch, bei grösseren Lagern wird häufig eine Knickarm-Raumaustragung installiert. Damit möglichst wenig Feinanteil entsteht, sind die Pellets schonend und auf kürzestem Weg in das Lager einzubringen und aus dem Lager auszutragen. Zusätzliche Einbringvorrichtungen, die bei der Hackschnitzellagerung eingesetzt werden (z. B. Siloverteiler), sollten nicht vorgesehen werden. Das Eindringen von Wasser ins Lager (z. B. durch Wände oder Befülleinrichtungen) und die Bildung von Kondenswasser im Lager (z. B. an kalten Wasserleitungsrohren, an kalten, nicht wärmegedämmten Lagerraumwänden/-decken oder durch das Einbringen von durchfeuchteter Transportluft ins kalte Pelletlager) sind unbedingt zu vermeiden. Weitere Hinweise sind in der **Broschüre *Lagerung von Holzpellets*** des DEPV [67] und von proPellets zu finden (siehe auch Kapitel 14.2.9).

Lagerhalle
Bei grösseren Holzheizwerken mit einer Holzkesselleistung über 1 MW sind anstelle teurer Unterflursilos auch Lagerhallen (Bild 6.5) mit Tagessilo zu prüfen. Lagerhallen sind geeignet für alle Brennstoffe. Die Befüllung ist aufwendig, da die Brennstoffe in der Regel aus einer Ablademulde mit einem Fördersystem bis unter die Firsthöhe gebracht und dort in der Lagerhalle verteilt oder mit einem Radlader bewirtschaftet werden müssen. Die Lagerhalle selbst ist dagegen kostengünstig. Lagerhallen werden auch als Zwischenlager genutzt.



Bild 6.5 Lagerhalle (Quelle: Franz Promitzer).

Aussenlager
Holzhackschnitzel oder Rinde können im Freien auf Halden (Bild 6.6) oder Rundholz auf Poltern (Bild 6.7) zwischengelagert werden. Das Aussenlager kann direkt beim Heizwerk, an einem zentralen Ort, welcher ganzjährig für LKWs zugänglich ist, oder im Wald liegen.



Bild 6.6 Zwischenlagerung von Holzhackschnitzeln im Freien (Quelle: AEE INTEC).



Bild 6.7 Polter bei Heizzentrale (Quelle: AEE INTEC).

6.3 Befüllung von Silos und Lagerhallen

6.3.1 Befüllung von Holzschnitzelsilos

Die Befüllung von Unterflursilos erfolgt meist durch Abkippen des Brennstoffs vom Lastwagen durch eine Einfüllöffnung. Durch eine optimale Anordnung der Einfüllöffnungen oder durch den Einsatz von Siloverteilern wird ein hoher Füllgrad erreicht.

Silodeckel

Bei bodenebenen Silos, die direkt mit LKWs befüllt werden, ist die Konstruktion des Silodeckels sehr wichtig. Wenn der Silodeckel nicht befahrbar ausgeführt wird, soll er auf einer mindestens 20 cm hohen Betonumrandung aufgesetzt (Bild 6.8 und Bild 6.10) werden. Damit kann das Eindringen von Regenwasser verhindert werden. Sofern ein befahrbarer Deckel (Bild 6.9) erforderlich ist, muss darauf geachtet werden, dass nach der Befüllung ein Verschliessen ohne Reinigungsaufwand für die Abwasserrinne und den Scharnierbereich erfolgen kann. Wegen der hohen Kosten und der Problematik des Wassereinbruchs sind befahrbare Silodeckel nach Möglichkeit zu vermeiden.

Silodeckel können auch in geteilter Ausführung gefertigt werden. Dadurch wird die Festigkeit verbessert, und durch das geringere Gewicht der einzelnen Deckelteile erhöht sich der Bedienungskomfort. Zudem fallen bei dieser Anordnung weniger Holzhackschnitzel seitlich neben die Einfüllöffnung, und es besteht keine Gefahr, dass der Silodeckel beschädigt wird, wenn die Hackschnitzel als kompakter Block aus dem LKW rutschen.

Die Einfüllöffnung muss entsprechend den örtlichen Unfallverhütungsvorschriften (siehe auch Kapitel 19) in der Regel mit einem Schutzgitter oder einem Rost abgedeckt werden. Da Holzhackschnitzel zu Brückenbildung neigen, können sie sich beim Einfüllen auf dem Schutzgitter festsetzen, wodurch der Materialfluss verlangsamt und die Abladedauer verlängert wird.

Für problemloses Abladen muss der Silodeckel um mehr als 90°, also über den Totpunkt hinaus, geöffnet werden können. Dadurch ergibt sich ausreichend Platz für das Kippfahrzeug und es wird gleichzeitig verhindert, dass der Silodeckel zufallen kann.



Bild 6.8 Silodeckel nicht befahrbar in offenem Zustand (Quelle: Schmid AG energy solutions).



Bild 6.9 Silodeckel nicht befahrbar im Hintergrund und befahrbar im Vordergrund. Beide im geschlossenen Zustand (Quelle: Schmid AG energy solutions).



Bild 6.10Nicht befahrbarer Faltdeckel (links geschlossen, Mitte geöffnet, rechts Befüllung. Quelle: Patrik Küttel).

Befüllungsschnecke
Bei Silos in Untergeschossen von Gebäuden übernehmen Befüllungsschnecken (Bild 6.11) den Brennstofftransport vom Einfüllschacht (Abwurfmulde) in den Silo und erhöhen zusätzlich dessen Füllgrad. Die waagrecht angeordneten Befüllungsschnecken transportieren den Brennstoff unterhalb der Silodecke über die gesamte Silolänge bis zur Tauchwand. Dank der hohen Förderleistung der Befüllungsschnecken (> 200 Srm/h) sind Abladezeiten von < 10 Minuten auch beim letzten Abladevorgang möglich. Befüllungsschnecken eignen sich für alle Arten von Hackschnitzeln, zerkleinerte Rinde und Sägespäne. Sie sind zudem unempfindlich gegenüber Brennstoffteilen mit Übergrösse und Steinen.

Vorteile:

- Hoher Füllgrad von Silos, die zum Hauptanteil unter einem Gebäude angeordnet sind.
- Bessere Raumausnutzung für die Heizanlage.

Nachteile:

- Zusätzliche Investitionskosten
- Etwas längere Abladezeiten für den Brennstofflieferanten.



Bild 6.11 Befüllungsschnecken (Quelle: Holzenergie Schweiz).

Siloverteiler
Der Siloverteiler (Bild 6.12) fördert die Holzhackschnitzel horizontal, sodass der Silo unabhängig von seiner Form gleichmässig befüllt wird. Der Siloverteiler funktioniert wie eine Befüllungsschnecke, wirkt jedoch von der Einfüllöffnung aus in zwei entgegengesetzte Richtungen. Die waagrecht angeordneten Schneckenförderer transportieren den Brennstoff unterhalb der Silodecke über die gesamte Silolänge. Dank der hohen Förderleistung der Befüllungsschnecken (> 250 Srm/h) sind Abladezeiten von < 10 Minuten auch beim letzten Abladevorgang möglich. Wenn es die baulichen Verhältnisse erlauben, ist der Einbau von drei Silodeckeln anstelle eines Silodeckels mit Siloverteiler vorzuziehen. Siloverteiler eignen sich für alle Arten von Holzhackschnitzeln, zerkleinerte Rinde und Sägespäne. Sie sind zudem unempfindlich gegenüber Brennstoffteilen mit Übergrösse und Steinen.

Die Vorteile von Siloverteilern sind:

- Geringer Energieverbrauch
- Unabhängig von Brennstoffform und Wassergehalt
- Unempfindlich gegen grössere Fremdkörper
- Lange Silos möglich
- Einsparung zusätzlicher Silodeckel.

Die wichtigsten Nachteile sind:

- Zusätzliche Investitionskosten



Bild 6.12 Siloverteiler (Quelle: Schmid AG energy solutions).

Vertikales Schneckenfördersystem für oberirdische Silos und Lagerhallen
Bei oberirdischen Silos und Lagerhallen übernimmt das vertikale Schneckenfördersystem (Bild 6.13) den Brennstofftransport ab der Abwurfmulde in das Silo oder in die Lagerhalle. Eine waagrecht angeordnete Transportschnecke fördert den Brennstoff von der Abwurfmulde zum vertikalen Schneckenfördersystem. Dieses fördert ihn senkrecht nach oben (maximale Förderhöhe rund 18 m) und übergibt ihn dann an die waagrecht angeordneten Verteilschnecken. Die Förderleistung erreicht etwa 60 Srm/h respektive 120 Srm/h bei einem Doppelförderschneckensystem, sofern das Volumen der Abwurfmulde grösser als das Transportvolumen des Lieferfahrzeugs ist. Das vertikale Schneckenfördersystem ist geeignet für alle Arten von Holzhackschnitzeln, für Rinde und für Sägemehl. Die maximale Stückigkeit ist P100.

Die Vorteile des Systems sind:

- Hoher Füllgrad
- Tiefe Baukosten für Silo

Zu den wichtigsten Nachteilen gehören:

- Zusätzliche Investitionskosten
- Zwischen den einzelnen Anlieferungen sind Pausen von bis zu einer Stunde einzulegen.



Bild 6.13 Vertikales Schneckenfördersystem (Quelle: Schmid energy solutions).



Bild 6.14 Pumpcontainer (Quelle: Amstutz Holzenergie AG).

Pumpcontainer/Pump-LKW
Ein Pumpcontainer/Pump-LKW (Bild 6.14) ermöglicht die Befüllung von Silos, wenn eine direkte Zufahrt mit Lieferfahrzeugen zum Abkippen nicht möglich ist. Die Holzhackschnitzel werden direkt vom Container/Lieferfahrzeug (Füllvolumen rund 30 m^3) mit dem internen Austragungssystem über flexible Leitungen in den unter- oder oberirdischen Silo gepumpt. Zur vollständigen Entleerung wird der Container gekippt. Pumpcontainer/Pump-LKW sind mobil und vielseitig einsetzbar und vor allem für trockene Qualitäts-Hackschnitzel aus Wald- und Industrierestholz mit geringem Feinanteil geeignet. Das System ist empfindlich gegenüber Brennstoffteilen mit Übergrösse und Steinen.
Seine wichtigsten Vorteile sind:

- Keine Verschmutzung der Abladestelle durch danebenfallende Holzhackschnitzel
- Einsparung der Investitionen für übliche Beschickungs- und Verteilsysteme
- Höchster Silofüllgrad (bis 90 %)

Nachteile sind:

- Abhängigkeit vom Energieholzlieferanten
- Längere Abladezeiten (ungefähr 30 Min. gegenüber Kippfahrzeugen mit ungefähr 5 Min.)
- Staubentwicklung bei trockenen Holzhackschnitzeln, ungeeignet für Schleifstaub und Hobelspäne
- Höhere Anlieferungskosten
- Lärm durch Pumpsystem

6.3.2 Befüllung und Bewirtschaftung von Lagerhallen

Vollautomatisches Kransystem
Das vollautomatische Kransystem dient zur Be- und Entladung von Lagerhallen (Bild 6.15). Ein automatischer oder handgesteuerter Greifkran greift das Energieholz aus einer Halde oder einem Abladebunker, verteilt es in der Lagerhalle und beschickt einen Tagessilo oder die Schubbodenzone. Bei Bedarf lassen sich auch unterschiedliche Brennstoffqualitäten mischen. Das System ist innerhalb der Kranbahnen höhen- und flächenunabhängig. Sofern das Abladevolumen grösser ist als das Transportvolumen des Lieferfahrzeugs, werden Leistungen bis zu 150 m^3/h erreicht. Das vollautomatische Kransystem eignet sich für alle Holzbrennstoffe ausser Hobelspänen und Staub und ist unempfindlich gegenüber Brennstoffteilen mit Übergrösse und Steinen.

Die wichtigsten Vorteile sind:

- Auf das Brennstoffsortiment anpassbar
- Automatische Bewirtschaftung möglich
- Mischen unterschiedlicher Brennstoffqualitäten
- Gute Lagerraumnutzung

Zu den Nachteilen gehören:

- Nur für grössere Lagerhallen sinnvoll einsetzbar
- Aufwendiger Betrieb (Verschleiss Stahlseile, Verschleiss Hebewerk, gesetzliche Wartungspflicht). Die hohe Auslastung erfordert einen Industriebaustandard des Kransystems.



Bild 6.15 Vollautomatisches Kransystem mit Ablademulde und Tagessilo (Quelle: Schmid energy solutions).

Be- und Entladesystem mit horizontal und vertikal verschiebbarem Kratzkettenförderer
Kratzkettenförderer mit Quermitnehmern sind in einem Rahmen montiert, welcher sich sowohl vertikal als auch horizontal verschieben lässt (Bild 6.16). Dadurch passt sich das Be- und Entladesystem automatisch dem jeweiligen Füllgrad der Lagerhalle an. Beim Beladen wirkt das System als Verteiler, beim Entladen fördert es die Holzhackschnitzel zum Brennstofftransportsystem der Feuerung. Die Einsatzlänge beträgt bis zu 28 m. Mit Ausnahme von Staub eignet sich das System für alle Holzbrennstoffe, und es ist unempfindlich gegenüber Brennstoffteilen mit Übergrösse und Steinen.

Die wichtigsten Vorteile sind:

- Optimale Ausnutzung des Hallenvolumens
- Auf das Brennstoffsortiment anpassbar
- Kann unterschiedliche Brennstoffsortimente kontrolliert in verschiedenen Bahnen einlagern und gezielt entladen.

Die wichtigsten Nachteile sind:

- Nur für grosse Lagervolumen sinnvoll
- Aufwendige Konstruktion

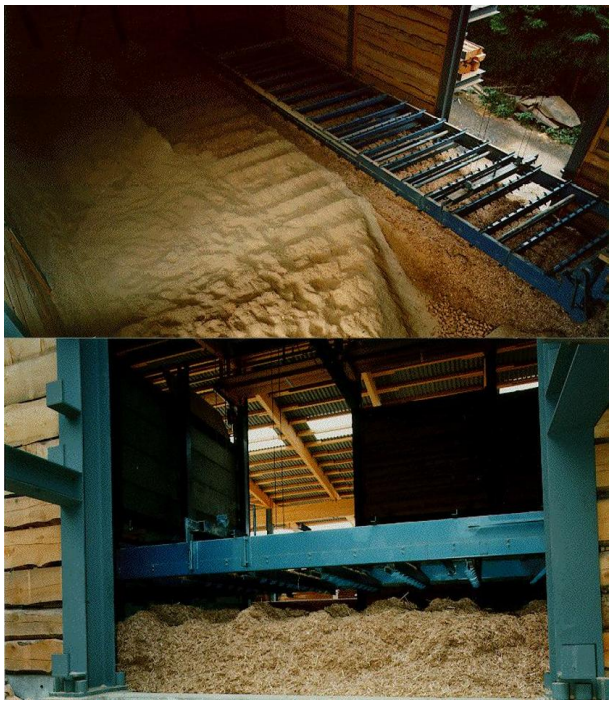


Bild 6.16 Be- und Entladesystem mit horizontal und vertikal verschiebbarem Kratzkettenförderer [68].

Radlader
Der Radlader (oder Teleskoplader) fördert das angelieferte oder das vor Ort frisch gehackte Energieholz in die Lagerhalle oder schüttet es auf die Halde (Bild 6.17). Von dort wird bei Bedarf ein Vorsilo befüllt. Das System ist arbeitsintensiv und zeitaufwendig. Der Radlader kann nicht automatisiert werden, ist jedoch sehr flexibel und für verschiedenste Aufgaben einsetzbar. Er eignet sich für alle Brennstoffsortimente ausser für Hobelspäne und Staub.

Die wichtigsten Vorteile des Radladers sind:

- Platzunabhängig, eine Mehrfachnutzung ist möglich
- Optimale Anpassung an den Brennstoff
- Möglichkeit, verschiedene Brennstoffarten zu separieren

Nachteile sind:

- Personalaufwendig
- Hoher Energieverbrauch
- Lärm



Bild 6.17 Radlader (Quelle: AEE INTEC).

Toploader
Ein Toploader (Bild 6.18) ist ein Be- und Entladesystem, welches keine Abwurfmulde benötigt. Es lagert das auf den Lagerraumboden abgeworfene Transportvolumen des Lieferfahrzeugs in den Lagerraum ein. Bei Bedarf fördert der Toploader Brennstoff vom aufgeschichteten Lager in den Kanal der Queraustragung, welche hinter der Rückwand der Lagerhalle angeordnet ist. Das System ist für alle Brennstoffe ausser Hobelspänen und Staub geeignet und unempfindlich gegenüber Brennstoffteilen mit Übergrösse und Steinen.

Der Toploader hat verschiedene Vorteile:

- Mehrfachnutzung des Lagerraums möglich
- Einfaches, ebenerdiges Abschütten des Brennstoffes
- Tiefe Baukosten für Lagerraum ab Bodenplatte, geringe statische Anforderungen
- Wartungsfreundlich dank guter Zugänglichkeit
- Geringer Strombedarf
- Automatische Bewirtschaftung inklusive Füllstandsmessung

Zu den Nachteilen gehören:

- Keine Zwischenlagerung des Brennstoffs, der zuletzt eingelagerte Brennstoff wird zuerst ausgelagert
- Relativ grosser Platzbedarf (Parkierbereich Toploader)



Bild 6.18 Toploader (Quelle: Vecoplan AG).

6.3.3 Befüllung von Spänesilos

Staub, Späne und trockene Holzhackschnitzel mit einem Wassergehalt < 20 % werden in Spänesilos gelagert (Bild 6.19). Die Befüllung eines Spänesilos ist stets mit der im Betrieb eingesetzten Späneabsauganlage kombiniert. Hierbei kann auch ein Hacker an die Absauganlage angeschlossen werden. Die Befüllung des Spänesilos mit dem trockenen und feinen Brennstoff erfolgt mittels eines Luftstroms, welcher durch einen Druckventilator erzeugt wird. Aufgrund der vergrösserten Querschnittsfläche im Silo entspannt sich der Förderstrom, und der Brennstoff fällt ins Silo. Ein sich automatisch abreinigendes Filtersystem scheidet die Feinanteile aus der Abluft aus. Bei zentralen Absaugsystemen trennt ein Zyklonfilter die Transportluft vom Energieholz. Je nach Feinanteil ist ein zusätzliches Filtersystem für die Abluft nötig. Bei einzelnen Fördersystemen wird die Transportluft zurückgeführt und wiederverwendet.

Das Befüllsystem von Spänesilos ist unabhängig von der zu überwindenden Höhendifferenz und der Silogrösse. Es ist exakt auf das jeweilige Energieholzsortiment auszulegen und reagiert empfindlich auf Steine und Brennstoffteile mit Übergrösse. Je nach Schalldämmung und Stückigkeit des Brennstoffs ist es mehr oder weniger lärmintensiv.

Die Vorteile dieses Systems sind:

- Gute Anpassung an die Gebäudestruktur möglich
- Staubfrei
- Problemlose Überwindung grosser horizontaler und vertikaler Distanzen

Die Nachteile sind:

- Nur für trockenen Brennstoff mit kleiner Stückigkeit geeignet
- Lärmintensiv
- Zusätzliche Siloeinrichtungen erforderlich
- Explosionsgefahr durch Staubanteil
- Hoher Stromverbrauch

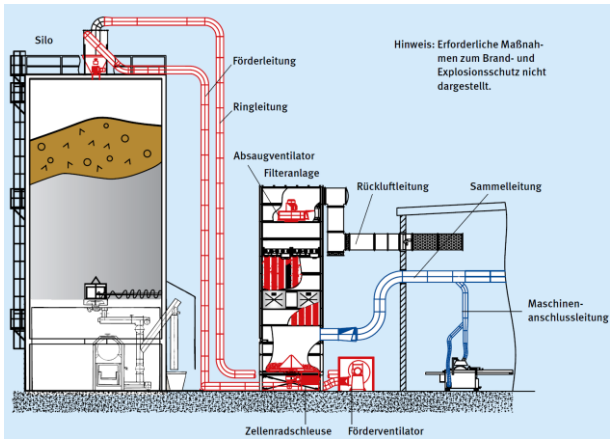


Bild 6.19 Silobefüllung mit betriebseigener Späneabsauganlage (Quelle: BGI 739-2 [69]).

6.3.4 Befüllung von Pelletlagern

Holzpellets werden in der Regel mit einem Pellet-Tankwagen zum Endverbraucher geliefert. Das Befüllen des Pelletlagers geschieht dann durch eine Schlauchleitung, die der Fahrer an einen Befüllstutzen des Lagers ankuppelt und durch welche die Pellets aus dem Fahrzeug ins Lager eingeblasen werden. Beim Einblasen der Pellets muss ein Druckausgleich erfolgen. Luftdichte Lager besitzen hierzu einen zweiten Stutzen, an den bei der Befüllung ein Absauggebläse mit Staubsack angeschlossen wird. Lediglich beim Gewebesilo kann auf einen solchen Absaugstutzen verzichtet werden, da bei diesem System die mit den Pellets eingeblasene Luft durch das Silogewebe aus dem Lager austreten kann. Der Druckaufbau für die Befüllung des Lagers erfolgt mittels Druckluft.



Bild 6.20 Pelletanlieferung mit Absaugsack (Quelle: Holzenergie Schweiz).

Wird das Pelletlager als Unterflursilo realisiert, kann die Befüllung auch durch Abkippen erfolgen. Die Lieferung grosser Pelletmengen kann auch mit einem Fahrzeug erfolgen, welches mit einem Schubboden ausgestattet ist und die Pellets in das Lager abschiebt. Das Abkippen oder Abschieben kann für die Pellets schonender sein als das Einblasen, es hat aber einige Nachteile. So muss ein zusätzlicher, unter Umständen befahrbarer Tiefbau als Silo ausserhalb des Gebäudes vorgesehen werden, und die Einfüllöffnung ist mit der Gefahr von Feuchtigkeitseintritt ins Lager verbunden.

6.4 Austragung

6.4.1 Austragungssysteme für alle Brennstoffe

Schubboden
Der Schubboden (Bild 6.21) ermöglicht bei grossflächigen Silos eine kontinuierliche Austragung des Energieholzes. Dabei werden eine oder mehrere Schubstangen durch Hydraulikzylinder horizontal vor- und zurückbewegt. Durch die keilförmigen Mitnehmer wird der Brennstoff in den Austragungskanal geschoben. Bei modernen Anlagen erfolgt die Vorwärtsbewegung der einzelnen Schubstangen gemeinsam, die Rückwärtsbewegung einzeln. Dadurch lassen sich die Schubkräfte der einzelnen Schubstangen verringern. Die Kräfte der Hydraulikzylinder müssen vom Gebäude aufgenommen werden. Das Gewicht über dem Schubsystem bestimmt die erforderlichen Schubkräfte, und die ganze Einrichtung ist dem Silo anzupassen. Der Schubboden eignet sich für alle Brennstoffe. Beim Einsatz von Rinde und grob zerkleinertem Landschaftspflegeholz wird der Einbau einer zusätzlichen Dosierwalze empfohlen. Der Schubboden ist unempfindlich gegenüber Brennstoffteilen mit Übergrösse und Steinen. Er eignet sich für Unterflursilos, Lagerhallen, Spänesilos, Pelletlager und mobile Hackschnitzelcontainer.

Die wichtigsten Vorteile des Schubbodens sind:

- Betriebssicher und unabhängig vom Wassergehalt des Brennstoffs
- Keine Antriebsteile im Silo
- Unabhängig von Form und Grösse des Energieholzes

Nachteile des Schubbodens sind:

- Hohe Schubkräfte auf Gebäude
- Verschleiss des Bodenbelags bei hohem jährlichem Brennstoffumsatz
- Beschränkte Förderlänge und -menge
- Nur geradliniger Einsatz möglich
- Mitunter hohe Lärmemissionen



Bild 6.21 Siloaustragung durch Schubboden (Quelle: Schmid energy solutions).

Kratzbodenförderer
Der Kratzbodenförderer kommt bei kleinflächigen Silos (Vorsilo, Tagessilo) zum Einsatz (Bild 6.22). Er funktioniert ähnlich wie ein Förderband. Auf Transportketten befestigte Querprofile nehmen das Energieholz mit. Die Einrichtung ist auf die jeweilige Silosituation abgestimmt. Die Silobreite und -höhe bestimmen die Anzahl der Transportketten. Der Kratzbodenförderer wird auf den Brennstoff aufgelegt und erzielt dadurch eine hohe Förderleistung. Das System eignet sich für alle Brennstoffe ausser Staub und ist unempfindlich gegenüber Brennstoffteilen mit Übergrösse und Steinen.

Die wichtigsten Vorteile des Kratzbodenförderers sind:

- Grosse Anpassungsmöglichkeiten an Brennstoff und Silosituation

Nachteile sind:

- Antriebsteile im Siloraum
- Hohe Investitionskosten
- Hoher Aufwand für Wartung und Instandsetzung
- Komplexe Konstruktion

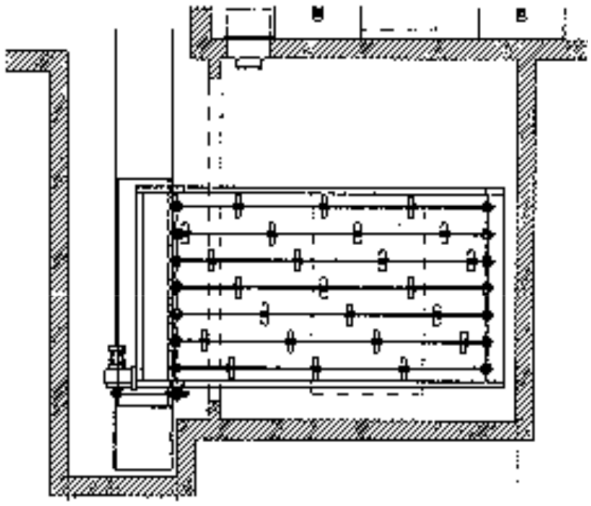


Bild 6.22 Siloaustragung durch Kratzboden [68].

Zentrumsschnecke
Mit der Zentrumsschnecke lassen sich quadratische und runde Silos entleeren. Die Zentrumsschnecke beschreibt am Boden des Silos einen Kreis um das Zentrum herum und fördert den Brennstoff horizontal in die Silomitte. Der Wirkdurchmesser ist > 4 m. Das System eignet sich sowohl für trockene Holzhackschnitzel als auch für Hobelspäne, Staub und Pellets. Es reagiert empfindlich auf Brennstoffteile mit Übergrösse und Steine.

Die Vorteile der Zentrumsschnecke sind:

- Einfache Konstruktion
- Geringe Neigung zu Brückenbildung
- Grosse Silohöhen möglich (geeignete Wartungsöffnungen zum Nachstochern vorausgesetzt)

Nachteile sind:

- Empfindlich auf Brennstoffteile mit Übergrösse und Steine (Aussortierung erforderlich)
- Antriebsteile im Siloraum

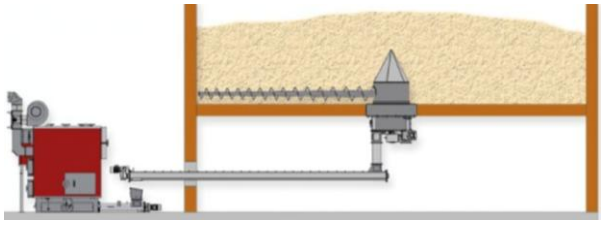


Bild 6.23 Austragungssystem mit Zentrumsschnecke (Quelle: Binder Energietechnik GmbH, Siloentnahmeschnecke Type SES-E1L von Gottwald GmbH Maschinenbau).

Konusschnecke

Die Konusschnecke (Bild 6.24) dient zur kontinuierlichen Entleerung von hohen Silos mit kreisförmiger, achteckiger oder runder Grundfläche. Die Konusschnecke fördert den Brennstoff zur Austragungsvorrichtung im Zentrum des Silos. Ihr Aufbau gleicht demjenigen der Zentrumsschnecke, ist jedoch nicht horizontal, sondern geneigt. Ihr Wirkdurchmesser liegt zwischen 1.5 m und 5.0 m. Die Konusschnecke eignet sich für hohe Silos und für trockene Brennstoffe, Hobelspäne und Staub.

Die wichtigsten Vorteile der Konusschnecke sind:

- Einfache Konstruktion
- Geringe Neigung zu Brückenbildung
- Grosse Silohöhe möglich (geeignete Wartungsöffnungen zum Nachstochern vorausgesetzt).

Zu den Nachteilen gehören:

- Keine volle Ausnutzung des Lagervolumens möglich, ein Restvolumen bleibt im Silo
- Erfasste Grundfläche beschränkt
- Antriebsteile im Siloraum



Bild 6.24 Austragungssystem mit Konusschnecke (Quelle: Schmid energy solutions).

Pendelschnecke

Mit der Pendelschnecke (Bild 6.25) lässt sich das Energieholz aus quadratischen und rechteckigen Silos kontinuierlich austragen. Die Pendelschnecke ist am Silorand befestigt. Sie pendelt halbkreisförmig innerhalb eines begrenzten Sektors am Siloboden horizontal hin und her und fördert das Energieholz zur Austragungsvorrichtung. Die Pendelschnecke eignet sich für alle Brennstoffe ausser für unzerkleinerte Rinde und grob zerkleinertes Landschaftspflegeholz, reagiert jedoch empfindlich auf Brennstoffteile mit Übergrösse und Steine.

Die Vorteile der Pendelschnecke sind:

- Einfache Konstruktion
- Geringe Neigung zu Brückenbildung
- Grosse Silohöhe möglich (geeignete Wartungsöffnungen zum Nachstochern vorausgesetzt)
- Keine Antriebsteile im Siloraum

Nachteilig sind:

- Keine volle Ausnutzung der Grundfläche möglich, ein Restvolumen bleibt im Silo
- Empfindlich auf Brennstoffteile mit Übergrösse und Steine (Aussortierung erforderlich)

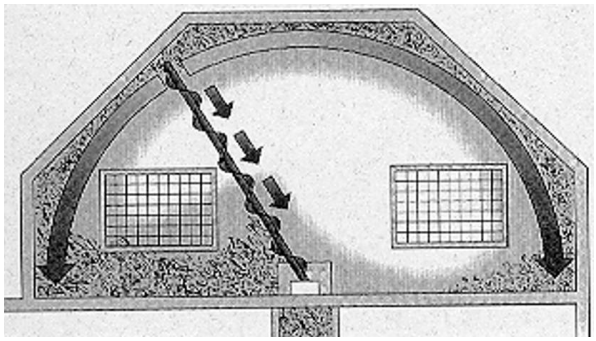


Bild 6.25 Austragungssystem mit Pendelschnecke [68].

Frässchnecke

Mit der Frässchnecke (Bild 6.26) werden hauptsächlich oberirdische Rund- und Hochsilos ausgetragen. Die Frässchnecke beschreibt am Boden des Silos einen Kreis um das Zentrum herum und fördert den Brennstoff mit einem Wirkdurchmesser von 2 m bis 20 m in die Silomitte. Sie eignet sich für alle Holzbrennstoffe mit einer maximalen Stückigkeit von 200 mm.

Die Vorteile der Frässchnecke sind:

- Einfache, robuste Konstruktion
- Grosse Silohöhen möglich

Die Nachteile der Frässchnecke sind:

- Brückenbildung in Abhängigkeit der Fliessfähigkeit des Brennstoffs möglich
- Antriebsteile im Siloraum
- Empfindlich gegenüber Brennstoffteilen mit Übergrösse und Steinen (Aussortierung erforderlich)



Bild 6.26 Frässchnecke (Quelle: JPA Fördertechnik).

6.4.2 Spezielle Austragungssysteme

Für Qualitäts-Hackschnitzel und Pellets sind folgende spezielle Austragungssysteme einsetzbar.

Knickarmaustragung
Mit der Knickarmaustragung (Bild 6.27) lassen sich quadratische und runde Silos für Qualitäts-Hackschnitzel und für Pellets kontinuierlich entleeren. Zwei Knickarme beschreiben am Siloboden einen Kreis um das Zentrum herum und fördern den Brennstoff horizontal in die Mitte des Raums. Der vom Knickarm beschriebene Radius vergrössert sich im Verlauf der Austragung, sodass auch peripher liegender Brennstoff noch erfasst und ausgetragen werden kann. Die Knickarmaustragung erfasst einen Durchmesser von rund 6 m, vermag eine Schütthöhe von 6 m zu bewältigen und kann horizontal oder schräg ausgeführt werden. Sie eignet sich für die Austragung von Qualitäts-Hackschnitzeln und Pellets.

Die Vorteile der Knickarmaustragung sind:

- Einfache Konstruktion
- Grosse Lagerhöhe möglich

Die Nachteile der Knickarmaustragung sind:

- Erfassbare Grundfläche begrenzt
- Antriebsteile im Lagerraum



Bild 6.27 Austragungssystem mit Knickarm für Qualitäts-Hackschnitzel und Pellets (Quelle: Holzenergie Schweiz).

Federkernaustragung
Die Federkernaustragung (Blattfederrührwerk-Austragung, Bild 6.28) dient zur kontinuierlichen Austragung von Qualitäts-Hackschnitzeln und Pellets aus quadratischen und runden Silos. Zwei oder drei Blattfederarme mit Mitnehmern fördern den Brennstoff mit Hilfe der Drehbewegung des Rührwerks zum offenen Kanal der Austragungsschnecke. Der von den Blattfederarmen beschriebene Radius vergrössert sich im Verlauf der Austragung, sodass auch peripher liegender Brennstoff noch erfasst und ausgetragen werden kann. Die Austragung erfolgt horizontal oder schräg nach oben. Der Wirkdurchmesser liegt bei maximal 6 m, die maximale Schütthöhe liegt bei 4 m (Pellets) beziehungsweise bei 6 m (Qualitäts-Hackschnitzel).

Die Vorteile der Federkernaustragung sind:

- Einfache Konstruktion
- Geringe Brückenbildung

Nachteilig sind:

- Erfassbare Grundfläche begrenzt
- Antriebsteile im Lagerraum



Bild 6.28 Federkernaustragung (Quelle: Herz).

Mittelschnecke mit Schrägboden
Die Mittelschnecke mit Schrägboden (Bild 6.29) dient zur kontinuierlichen Austragung von Pellets aus rechtwinkligen Lagerräumen. Die Pellets werden von einer Schnecke ausgetragen, welche mittig im Raum auf dem Boden des Lagerraums in einem Trog verlegt ist und deren Länge über den gesamten Lagerraum reicht. Ein Schrägboden mit glatter Oberfläche sorgt dafür, dass die Pellets vollständig der Schnecke zugeführt werden. Der Schrägboden verhindert das Zurückbleiben von Pellets und ein Aufkonzentrieren von Abrieb und Bruchstücken im Lagerraum. Um den Lagerraumverlust durch den Schrägboden möglichst gering zu halten, kommt dieses Austragungssystem nur in schmalen, hohen Pelletlagerräumen zur Anwendung. Der Schrägboden muss eine Neigung von > 40° aufweisen und sehr stabil ausgeführt sein. Damit die Pellets während des Transports nicht zu stark zerstört werden, sollte die Transportdistanz vom Lager zum Heizkessel möglichst kurz und ohne Umlenkungen sein. Richtungsänderungen können Störungen verursachen.

Die Vorteile dieses Systems sind:

- Keine Antriebsteile im Lagerraum
- Geringer Hilfsenergieverbrauch
- Kostengünstig

Die Nachteile sind:

- Keine volle Ausnutzung des Lagerraumvolumens (Nutzvolumen ≈ 2/3 des Raumvolumens)
- Das Lagervolumen ist durch die maximale Länge der Schnecke und durch die maximal zulässige Schütthöhe begrenzt.
- Aufwendige Konstruktion des Schrägbodens
- Nur geradlinige Förderung möglich, keine Kurven
- Beschränkter Förderneigungswinkel

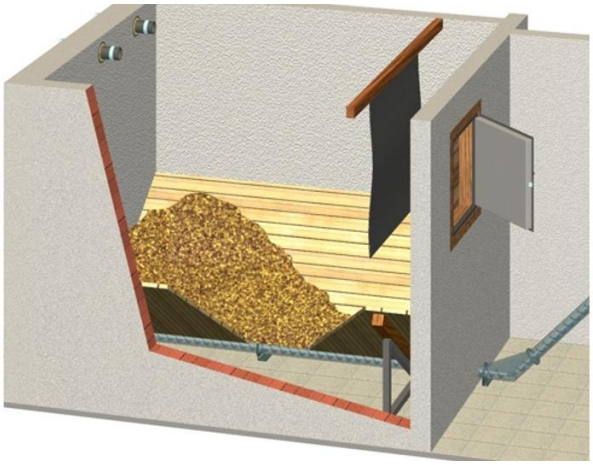


Bild 6.29 Pellet-Austragungssystem mit Schrägboden [68].

Saugsysteme für Pelletlager
Pellet-Saugsysteme mit Absaugsonden, die gleichmässig auf dem Pelletlagerboden angeordnet sind, und das Entnahmesystem «Maulwurf» (Bild 6.30) fördern die Pellets direkt pneumatisch aus dem Pelletlagerraum zum Kessel. Saugsysteme für Pellets haben ihr Einsatzgebiet bei Pelletkesselanlagen bis zu 300 kW Nennleistung. Diese haben jedoch den Nachteil eines erhöhten Energieaufwands für die Brennstoffförderung, weshalb diese bei einer Nennleistung über 50 kW bei einer Vollkostenrechnung über die Lebensdauer zu berücksichtigen sind. Weiter ist auch der Verschleiss bei den Saugfördereinrichtungen zu beachten. Im Gegenzug sind diese Anlagen dafür flexibler und vielseitiger bezüglich der Planung von Pelletlager und Standort der Kesselanlage.



Bild 6.30 Pellet-Maulwurf (Quelle: Schellinger KG).

6.5 Fördersysteme

Schneckenförderer
Mit dem Schneckenförderer (Bild 6.31) lässt sich das Energieholz horizontal bis vertikal fördern. Eine Schneckenwendel in Einfach- oder Zwillingsausführung transportiert den Brennstoff in einem offenen oder geschlossenen Schneckentrog. Ausserhalb des Lagerraums sind aus Gründen der Arbeitssicherheit und des Gesundheitsschutzes nur geschlossene Fördersysteme einzusetzen. Der Antrieb erfolgt durch einen Elektromotor, der bei Bedarf regelbar ist. Der Schneckenförderer ist als Vollblatt- oder Drahtschnecke ausgeführt (nicht als seelenlose Blattschnecke).

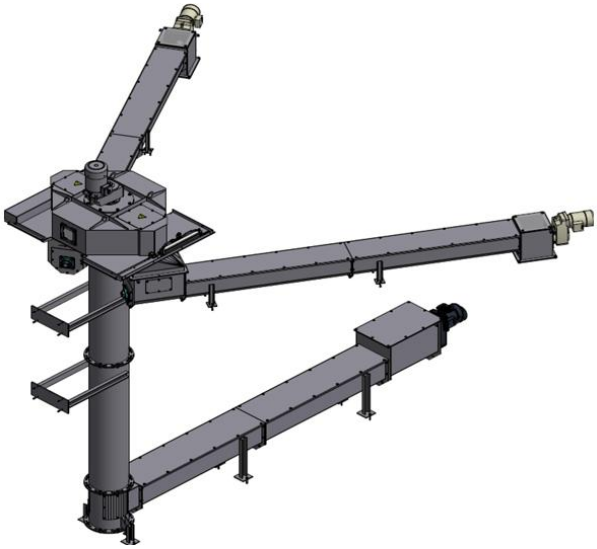


Bild 6.31 Schneckenförderer horizontal bis vertikal fördernd (Quelle: Schmid energy solutions).

Die Grösse des Kerndurchmessers und die Nennweite des Schneckentrogs sind mitbestimmend für die förderbare Stückigkeit des Brennstoffs. Das System funktioniert unabhängig vom Wassergehalt des Brennstoffs und ermöglicht dank seiner einfachen Konstruktion eine unkomplizierte Handhabung. Es ist geeignet für alle Brennstoffarten inklusive Pellets mit Ausnahme von unzerkleinerter Rinde und grob zerkleinertem Landschaftspflegeholz, und es ist unempfindlich gegenüber Brennstoffteilen mit Übergrösse und Steinen.

Die Vorteile des Schneckenförderers sind:

- Hoher Wirkungsgrad
- Kleine Baumasse
- Kostengünstige und einfache Konstruktion
- Einfache Anwendung
- Kleiner elektrischer Energieverbrauch

Zu den Nachteilen gehören:

- Beschränkte Stückigkeit des Brennstoffes
- Nur geradlinige Förderung möglich, keine Kurven

Schubsystem
Mit dem Schubsystem (Bild 6.32) lässt sich Energieholz horizontal fördern. Ein oder mehrere hydraulische Zylinder bewegen eine oder mehrere Schubstangen mit Querstreben vor und zurück. Dank der keilförmigen Mitnehmer wird der Brennstoff in die gewünschte Richtung geschoben. Die Mitnehmer können der örtlichen Situation angepasst werden. Das Brennstoffgewicht über dem Schubsystem bestimmt die Schubkräfte, welche vom Gebäude aufgenommen werden müssen. Das

Schubsystem eignet sich mit Ausnahme von Hobelspänen und Staub für alle Brennstoffe und ist unempfindlich gegenüber Brennstoffteilen mit Übergrösse und Steinen.

Seine Vorteile sind:

- Grosse Betriebssicherheit
- Unabhängig von Form, Grösse und Wassergehalt des Energieholzes
- Keine Antriebsteile im Silo

Seine Nachteile sind:

- Hohe Schubkräfte auf Gebäude
- Beschränkte Förderlänge und Fördermenge
- Nur geradliniger Einsatz möglich
- Wartung und Instandsetzung erforderlich

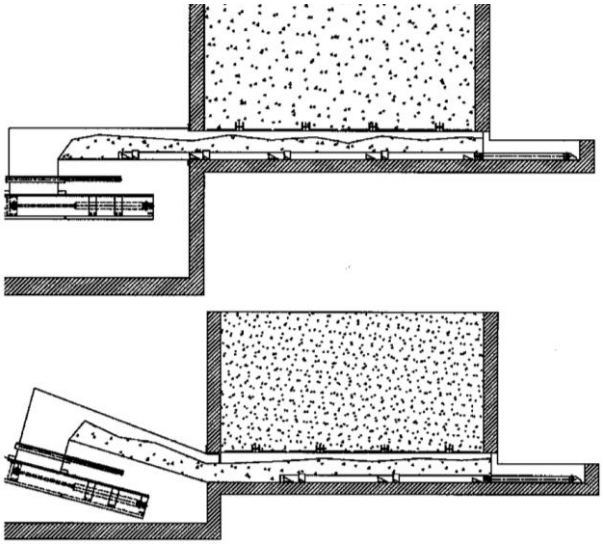


Bild 6.32 Schubsystem horizontal fördernd (oben) und steigend fördernd (unten) [68].

Kratzkettenförderer

Mit dem Kratzkettenförderer (Bild 6.33) lässt sich ein breites Spektrum von Energieholz horizontal oder vertikal fördern. Der Kratzkettenförderer funktioniert ähnlich wie ein Förderband. In einer geschlossenen Kastenkonstruktion laufen zwei Ketten parallel. Dazwischen sind Mitnehmer montiert, die das Energieholz an den Bestimmungsort schieben. Mit entsprechenden Modifikationen (verschiedene Abwurföffnungen) lassen sich auch grosse Silos und Lagerhallen befüllen. Der Kratzkettenförderer ist unempfindlich gegenüber Brennstoffteilen mit Übergrösse und Steinen und eignet sich für alle Brennstoffe mit Ausnahme von Spänen, Staub und Pellets.

Seine Vorteile sind:

- Hohe Förderleistung
- Vielfältige Einsatzmöglichkeiten

Seine Nachteile sind:

- Aufwendige Konstruktion
- Hohe Investitionskosten
- Wartung und Instandsetzung erforderlich
- Lärm



Bild 6.33 Kratzkettenförderer [68].

Pneumatische Förderung

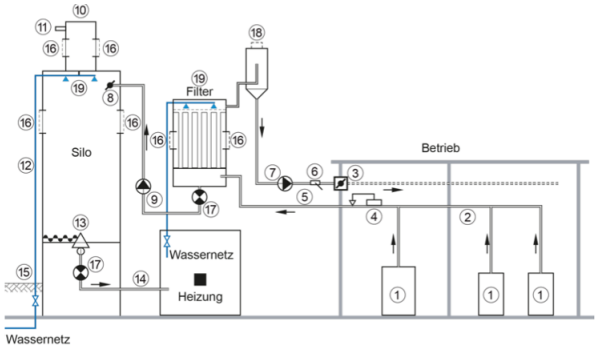
Bei der pneumatischen Förderung (Bild 6.34) wird das Energieholz mittels Luftstroms in den Silo geblasen. Dabei scheidet ein automatisch abreinigendes Filtersystem die Feinanteile aus der Abluft ab. Bei zentralen Absaugsystemen trennt ein Zyklonfilter die Transportluft vom Energieholz; diese wird teilweise zurückgeführt und wiederverwendet. Mit der pneumatischen Förderung lassen sich auch grosse horizontale und vertikale Distanzen überwinden. Sie erfordert aber eine exakte Auslegung in Funktion des konkreten Energieholzsortiments. Das System eignet sich für trockene Holzhackschnitzel, Späne, Staub und Pellets und ist empfindlich gegenüber Brennstoffteilen mit Übergrösse und Steinen.

Die Vorteile der pneumatischen Förderung sind:

- Gute Anpassung an die Gebäudesituation
- Umgebung bleibt staubfrei
- Grosse horizontale und vertikale Distanzen überwindbar

Die wichtigsten Nachteile sind:

- Beschränkt auf trockenes Energieholz mit kleiner Stückigkeit
- Lärmintensiv
- Zusätzliche Siloeinrichtungen erforderlich
- Explosionsgefahr durch Staubanteil
- Hoher Stromverbrauch



Legende:

1 Holzbearbeitungsmaschinen
2 Absaugleitung
3 Brandschutzklappe
4 Funkenerkennung mit Löschanlage sofern erforderlich
5 Abluft ins Freie (Sommerbetrieb)
6 Umschaltklappe (Rückluft-Abluft)
7 Ventilator
8 Rückschlagklappe
9 Förderventilator
10 Filter Endabscheidung
11 Reinluft ins Freie (Abluft)
12 Löschleitung
13 Späneaustragung
14 Transportanlage zur Feuerung
15 Anschluss an das Wassernetz
16 Druckentlastung
17 Zellradschleuse
18 Explosionsschlot mit Berstscheibe
19 Löscheinrichtung

Bild 6.34 Pneumatische Förderung (Quelle: VKF 104-15 Spänefeuerungen [70]).

6.6 Feuerungsbeschickung

Über die Beschickungseinrichtungen wird der Brennstoff in die Feuerung geführt. Bei Mehrkesselanlagen besitzt jede Anlage eine eigene Beschickung. In der Regel erfolgt die Beschickung mit Schneckenförderern oder hydraulischen Einschiebern.

Schneckenförderer

Schneckenförderer oder Stokerschnecken (Bild 6.35) ermöglichen eine kontinuierliche Beschickung ohne Verdichtung des Brennstoffes. Damit ergibt sich eine gleichmässige, jedoch auf eine Seite beschränkte Belegung des Feuerungsrostes. Durch den Einsatz von Doppelschneckenförderern lässt sich die gleichmässige Rostbelegung auf die gesamte Rostbreite erweitern.



Bild 6.35 Beschickung mit Schneckenförderer (Quelle: Schmid AG energy solutions).

Hydraulische Einschieber

Hydraulische Einschieber (Bild 6.36) beschicken die Feuerung diskontinuierlich mit Brennstoff. Deshalb wird er leicht verdichtet. Eine vorgegebene Brennstoffmenge wird jeweils durch eine Schleuse vor den Einschieber gebracht und anschliessend langsam kontinuierlich der erforderlichen Feuerungsleistung entsprechend in die Feuerung geschoben. Bei Brennstoffen mit hohem Fremdstoffanteil (Altholz) kann erhöhter Verschleiss am Einschiebstössel und am Einschiebkanal auftreten.

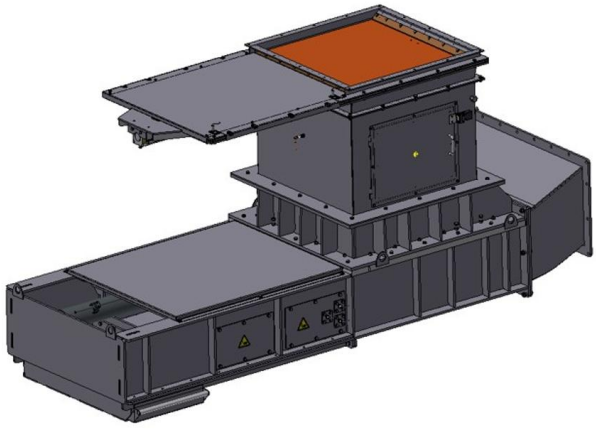


Bild 6.36 Beschickung mit hydraulischem Einschieber (Quelle: Schmid energy solutions).

Direkteinschieber (Schubsendersysteme)

Bei Direkteinschiebern (Schubsendersysteme, Bild 6.37) findet eine starke Verdichtung des Brennstoffs statt. Damit der verdichtete Brennstoff auf einem Bewegtrost optimal verbrennen kann, ist er vorher durch zusätzliche Massnahmen wieder aufzulockern. Die Verdichtung lässt sich auch durch die Anordnung einer Entlastungszone im Einschubkanal reduzieren. Um Leistungsschwankungen zu vermeiden, wird der Brennstoff kontinuierlich, entsprechend der erforderlichen Feuerungsleistung, in die Feuerung geschoben.

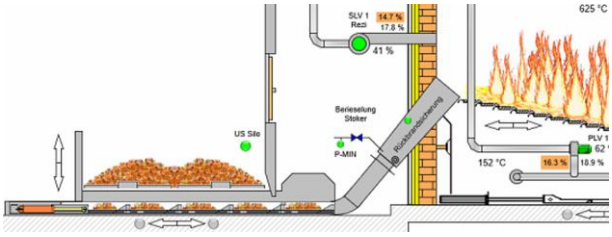


Bild 6.37 Beschickung mit Direkteinschieber (Quelle: Agro Forst & Energietechnik GmbH).

6.7 Rückbrandsicherung im Brennstoffördersystem

Zur Verhinderung eines Rückbrandes vom Feuerraum in die Brennstoffzuführung und in das Brennstofflager sind automatisch beschickte Holzfeuerungen mit Rückbrandsicherungen auszurüsten. Die entsprechenden Vorschriften sind länderspezifisch.

CH und AT: Vorgeschrieben sind mindestens zwei unabhängige Einrichtungen: eine Löscheinrichtung in der

Brennstoffzuführung mit thermischer, stromunabhängiger Auslösung sowie mindestens eine weitere wasserunabhängige Einrichtung wie Fallstufe, Schieber, Rückbrandklappe, Zellradschleuse oder dergleichen (Bild 6.38).

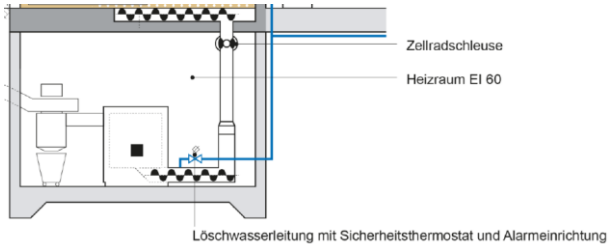


Bild 6.38 Rückbrandsicherung, Fallschacht, Zellradschleuse (Quelle: VKF 104-15 Spänefeuerungen [70]).

DE: Bei mechanisch beschickten Holzfeuerungsanlagen muss eine Sicherheitseinrichtung vorhanden sein, die einen Rückbrand und einen Funkenflug in die Förder- oder Dosiereinrichtung sowie in den Heizraum verhindert (siehe Kapitel 19).

Löscheinrichtung
Mit der Löscheinrichtung wird zur Verhinderung eines Rückbrands im Auslösefall durch einen thermischen, stromunabhängigen Auslöser Leitungswasser in den Brennstoffkanal gespritzt. Löschwasserventil und Temperaturauslöser gehören zum Lieferumfang des Holzkessels. Für den Anschluss der Verrohrung sind die Planerin oder der Planer zuständig und der Einbau eines Schmutzfilters sollte beachtet werden.

Fallstufe
Eine Fallstufe (Fallschacht) in der Brennstoffzuführung schafft einen örtlichen Unterbruch im Fördersystem und verhindert dadurch einen Rückbrand.

Schieber und Rückbrandklappen
Schieber und Rückbrandklappen werden im Fallschacht der Brennstoffzuführung eingebaut. Bei Überschreitung einer einstellbaren Grenztemperatur löst ein Thermostat den Schliessvorgang aus und sperrt die Brennstoffzufuhr.

Zellradschleuse
Die Zellradschleuse besteht aus einem mehrflügeligen, in einem Metallgehäuse eingebauten Schleusenrad und ist im Fallschacht platziert. Der Antrieb erfolgt mittels Elektromotors, der mit den Fördermotoren gekoppelt ist. Im Stillstand sperren die Radflügel den Brennstoffdurchgang ab und verhindern damit einen Rückbrand.

Im druckbehafteten Spänesilo trennt die Zellradschleuse das Silo vom drucklosen Transportsystem.

6.8 Entaschung

Zu den mechanischen Entaschungsfördereinrichtungen gehören Förderschnecken, Schubstangenförderer, Kratzkettenförderer, Trogkettenförderer, Becherförderer und Nassentaschung mit Kratzkettenförderern (Bild 6.39 bis Bild 6.41). Diese fördern alle Qualitäten von Aschen aus dem Feuerraum in die Aschebehälter oder Aschebunker und vermögen dabei abgesehen von Förderschnecken auch grössere Distanzen zu überwinden.

Vorteile sind:

- Geringe Störungsanfälligkeit
- Unempfindlich auf Fremdteile, Schlackenteile und Glutpartikel
- Geringer Hilfsenergiebedarf
- Geringe Lärmemissionen.

Die wichtigsten Nachteile sind:

- Hoher Platzbedarf (ungeeignet bei engen Platzverhältnissen)
- Hoher Verschleiss bei schlackenreicher Asche oder Asche mit hohem Fremdanteil



Bild 6.39 Feuerraumentaschungsschnecke (Quelle: Schmid energy solutions).



Bild 6.40 Unterrostentaschung, Austragung mittels Schubboden (Quelle: Schmid AG energy solutions).



Bild 6.41 Mechanische Entaschungsfördereinrichtung: mit Kratzkettenförderer (Quelle: AEE INTEC).

7 Hydraulik der Wärmeerzeugung

7.1 Hydraulische Grundlagen

Dieses Kapitel behandelt die Anforderungen an die Hydraulik der Wärmeerzeugung. Die Hydraulik der Wärmeverteilung wird im vorliegenden Planungshandbuch von QM Holzheizwerke nicht weiter behandelt, es wird dazu auf das Planungshandbuch Fernwärme [19] verwiesen.

Die detaillierten Anforderungen an die Auslegung der hydraulischen und regeltechnischen Lösungen in Bezug auf die Wärmeerzeugung sind in Band 2 und Band 5 der Schriftenreihe QM Holzheizwerke (Standard-Schaltungen Teil I [62] und Teil II [71]) aufgeführt.

In den Standard-Schaltungen Teil I und Teil II werden für jede der jeweils acht Grundvarianten eines «Wärmeerzeugungssystems mit Holzfeuerungsanlage» die hydraulische und regelungstechnische Lösung umfassend als separates Gesamtdokument mit den folgenden Abschnitten detailliert beschrieben:

- Kurzbeschreibung und Verantwortlichkeit
- Prinzipschema und Auslegung
- Funktionsbeschreibung
- Datenaufzeichnung zur Betriebsoptimierung
- Zusatz zum Abnahmeprotokoll

Es wird empfohlen, wann immer möglich eine der **bewährten Standardschaltungen** zu wählen, um die grundlegenden Qualitätsanforderungen an die Hydraulik und Regelung zu erfüllen.

Hinsichtlich der Hydraulik der Wärmeerzeugung werden damit unter anderem Grundsätze wie die Erweiterbarkeit der Wärmeerzeugung um einen weiteren Holzkessel, die strikte druckdifferenzarme Entkopplung hydraulischer Kreise (Bypass/hydraulische Weiche) und die Einhaltung minimaler Ventilautoritäten beachtet.

Vereinfachte Berechnung von Durchfluss (Volumenstrom), Druckdifferenz (Förderhöhe) und Pumpenleistung

In der Hydraulik der Wärmeerzeugung stellen sich für die Auslegung der Kesselkreise oft die folgenden drei Fragen:

- Wie gross muss der Durchfluss sein?
- Wie gross ist die Druckdifferenz über dem Regelventil bei diesem Durchfluss?
- Wie gross ist der Leistungsbedarf der Pumpe, um diesen Durchfluss zu bewerkstelligen?

Die folgenden drei vereinfachten Formeln beantworten diese Fragen in der Regel mit ausreichender Genauigkeit.

Durchfluss:

$$\dot{V}\left[\frac{m^3}{h}\right] = 0.86\ \frac{\dot{Q}\ [kW]}{\Delta T\ [K]}$$

Druckdifferenz:

$$\Delta p\ [kPa] = 100\left(\frac{\dot{V}\left[\frac{m^3}{h}\right]}{k_V\left[\frac{m^3}{h}\right]}\right)^2$$

Pumpenleistung:

$$P_{Pumpe}\ [kW] = 0.86\ \frac{\Delta p\ [kPa]\ \dot{V}\left[\frac{m^3}{h}\right]}{3600\ \eta_{Pumpe}\ [-]}$$

$\dot{V}$	Durchfluss in m³/h
$\dot{Q}$	Wärmeleistung in kW
ΔT	Temperaturdifferenz in K
Δp	Druckdifferenz in kPa
k_V	Durchflussfaktor in m³/h
P_{Pumpe}	Leistungsaufnahme Pumpe in kW
η_{Pumpe}	Pumpenwirkungsgrad

Wichtiger Hinweis:
Diese Formeln gelten näherungsweise für Wasser von 5 °C bis 95 °C. Es handelt sich um Zahlenwertgleichungen, bei denen die Grössen in den vorgeschriebenen Einheiten eingesetzt werden müssen. Der Faktor 0.86 entspricht dem Kehrwert des Produkts aus Dichte [kg/m³] und Wärmekapazität [kWh/(kg*K)].

7.2 Regelung Kesselkreis

Um die Kesselkorrosion an den Wänden der Abgasrohre gering zu halten, wird von den Kesselherstellern eine Mindesteintrittstemperatur des Wassers in den Kessel vorgeschrieben (siehe Kapitel 5.4). Diese minimale Kesseleintrittstemperatur wird durch entsprechendes Beimischen des Vorlaufs zum Rücklauf über eine hydraulische Beimischschaltung im Kesselkreis über ein Dreiwegeventil gewährleistet. Zur Sicherstellung einer konstanten Kesselaustrittstemperatur wird diese zusätzlich indirekt über das Dreiwegeventil geregelt, indem die Kesseleintrittstemperatur angehoben oder gesenkt wird. Grundlagen zur Auslegung des Regelventils in der Beimischschaltung sind im Folgenden dargestellt.

7.2.1 Regelventil Kesselkreis

Im Kesselkreis werden üblicherweise Dreiwegeventile mit zwei Eingängen und einem Ausgang, sogenannte Mischventile, eingesetzt (siehe Bild 7.1).

Das hydraulische Verhalten der Regelventile wird durch die sogenannte Grundkennlinie beschrieben. Diese stellt den Hub in Funktion des Durchflusses dar. Dreiwegeventile werden üblicherweise mit zwei unterschiedlichen Grundkennlinien angeboten:

- **Lineare Grundkennlinie**: Gleiche Hubänderungen haben gleiche Durchflussänderungen zur Folge (Anwendung: Regelkreis ohne Wärmeübertrager).

- **Gleichprozentige Grundkennlinie**: Gleiche Hubänderungen ergeben eine prozentual gleich grosse Änderung des aktuellen Durchflusses (Anwendung: Regelkreis mit Wärmeübertrager).

Weitere Hinweise zu Regelventilen sind im Planungshandbuch Fernwärme zu finden ([19] Kapitel 8.4.4).

Die Hersteller geben zu jedem Regelventil einen Durchflussfaktor an (**k_{VS}-Wert**). Damit kann der Druckabfall über dem voll geöffneten Regelventil bei 100 % Durchfluss mit Hilfe der folgenden Druckdifferenzformel berechnet werden:

$$\Delta p_{V,100}\ [\text{kPa}] = 100 \left(\frac{\dot{V}_{100}\ \left[\frac{m^3}{h}\right]}{k_{VS}\ \left[\frac{m^3}{h}\right]} \right)^2$$

$\Delta p_{V,100}$	Druckabfall über dem Ventil bei 100 % Durchfluss
$\Delta p_{V,0}$	Druckabfall über dem Ventil bei 0 % Durchfluss, wenn dieses gerade zu öffnen beginnt
$\Delta p_{var,100}$	Druckabfall über der grün eingezeichneten Strecke mit variablem Durchfluss (Bild 7.1)

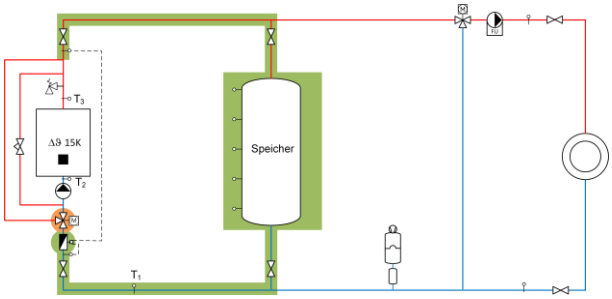


Bild 7.1 Kesselkreis mit konstantem Durchfluss und der Strecke mit variablem Durchfluss in Grün.

Für die Auslegung des Regelventils der Rücklaufhochhaltung ist die Strecke mit variablem Durchfluss massgebend (siehe grün markierte Strecke in Bild 7.1). Die Druckdifferenz der Strecke mit variablem Durchfluss sollte dabei möglichst klein sein. Die Pumpe im Kesselkreis wird mit konstantem Durchfluss betrieben, womit eine Temperaturregelung möglich ist. Das bedeutet, dass mit dem Regelventil die Kesseleintrittstemperatur reguliert wird, damit bei konstantem Durchfluss im Kessel eine konstante Kesselaustrittstemperatur gefahren werden kann. Mit den nachfolgenden Formeln können der Ventil- und Pumpendurchfluss sowie die Ventilautorität (VA) im Kesselkreis bestimmt werden.

Ventildurchfluss:

$$\dot{V}_V\ \left[\frac{m^3}{h}\right] = 0.86\ \frac{\dot{Q}\ [\text{kW}]}{T_3 - T_1\ [\text{K}]}$$

Pumpendurchfluss:

$$\dot{V}_P\ \left[\frac{m^3}{h}\right] = 0.86\ \frac{\dot{Q}\ [\text{kW}]}{T_3 - T_2\ [\text{K}]}$$

Ventilautorität:

$$VA = \frac{\Delta p_{V,100}}{\Delta p_{V,100} + \Delta p_{var,100}}$$

$\dot{V}_P$	Durchfluss in m³/h
$\dot{V}_V$	Durchfluss in m³/h
VA	Ventilautorität
$\dot{Q}$	Wärmeleistung in kW
$T_{1..3}$	Temperatur am Messpunkt 1 bis 3 in °C gemäss Bild 7.1
$\Delta p_{V,100}$	Druckabfall über dem Ventil bei 100 % Durchfluss
$\Delta p_{var,100}$	Druckabfall über der grün markierten Strecke mit variablem Durchfluss (Bild 7.1)

Wichtiger Hinweis:
Diese Formeln gelten näherungsweise für Wasser von 5 °C bis 95 °C. Es handelt sich um Zahlenwertgleichungen, bei denen die Grössen in den vorgeschriebenen Einheiten eingesetzt werden müssen. Der Faktor 0.86 entspricht dem Kehrwert des Produkts aus Dichte [kg/m³] und Wärmekapazität [kWh/(kg*K)].

Ventilautorität

Wenn ein Ventil in eine hydraulische Schaltung eingebaut wird, verhält es sich nicht mehr entsprechend der Grundkennlinie, weil die Druckdifferenz über dem Ventil zu einem variablen Teil des Gesamtdruckgefälles der Anlage wird. Dies hat zur Folge, dass die Grundkennlinie mehr oder weniger deformiert wird. Mit zunehmender Deformation wird die Genauigkeit und die Geschwindigkeit der Regelung immer mehr beeinträchtigt, und im Extremfall wird der Regelkreis instabil und beginnt zu schwingen.

Als Mass für die Deformation der Grundkennlinie wird die Ventilautorität herangezogen. Die Formel zur Berechnung der Ventilautorität (VA) ist oben aufgeführt. Dabei spielt der Druckabfall über demjenigen Teil der hydraulischen Schaltung eine wichtige Rolle, dessen variabler Durchfluss durch das Ventil beeinflusst wird (siehe Bild 7.1, grün markierte Strecke).

Bei hydraulischen Schaltungen mit Dreiwegeventilen treten keine Stabilitätsprobleme auf, solange folgende Regel eingehalten wird:

$$VA = \frac{\Delta p_{V,100}}{\Delta p_{V,100} + \Delta p_{var,100}} \geq 0.5$$

(Zielwert, Grenzwert in Ausnahmefällen VA ≥ 0,3)

Daraus ergibt sich: $\Delta p_{V,100} \geq \Delta p_{var,100}$

Bei 100 % Durchfluss muss der Druckabfall über dem offenen Dreiwegeventil ($\Delta p_{V,100}$) gleich gross oder grösser sein als der Druckabfall über der Strecke mit variablem Durchfluss ($\Delta p_{var,100}$).

Oft werden **mehrere Kesselkreise in Beimischschaltung** druckdifferenzarm angeschlossen (z. B. an einen Wärmespeicher). Jede Kesselpumpe holt sich somit ihre Wassermenge über ihr Ventil und die Strecke mit variablem Durchfluss (siehe Bild 7.2). Dabei ergibt sich eine

weitere Frage: *«Wie gross darf die Druckdifferenz über der Strecke mit variablem Durchfluss maximal sein?»* Wenn nämlich diese Druckdifferenz allzu gross wird, beeinflussen sich die einzelnen Kesselkreise gegenseitig. Dies kann dazu führen, dass der Durchfluss einer Kesselpumpe mit zu geringer Förderhöhe reduziert wird und die Nennleistung des zugehörigen Kessels nicht mehr abgegeben werden kann. Um dies zu verhindern, gilt es, zusätzlich zur Einhaltung der Regel zur Ventilautorität, die nachfolgende Regel einzuhalten.

Mehrere Kesselkreise in Beimischschaltung

Wenn mehrere Kesselkreise druckdifferenzarm in Beimischschaltung angeschlossen werden (z. B. an einen Wärmespeicher), dann darf die maximale Druckdifferenz über der Strecke mit variablem Durchfluss nicht grösser sein als 20 % der Förderhöhe der kleinsten Kesselpumpe im Auslegepunkt (siehe Bild 7.2).

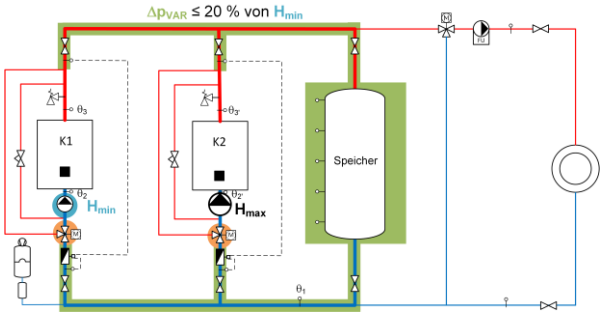


Bild 7.2 Kesselkreise mit konstantem Durchfluss bei Mehrkesselanlagen. Kessel 1 wird beim Parallelbetrieb der beiden Kessel bei Kesselnennleistung beeinflusst, respektive wesentlich reduziert.

7.2.2 Bypass im Kesselkreis

Bei einer korrekt ausgelegten hydraulischen Schaltung arbeitet das Regelventil einigermassen linear. 50 % Durchfluss entsprechen 50 % Hub, 100 % Durchfluss entsprechen 100 % Hub.

Wird der Regelbereich des Regelventils ohne Bypass im Kesselkreis durch unterschiedliche Temperaturniveaus zwischen Hauptrücklauf- und Kesseleintrittstemperatur stark eingeschränkt, so kann dies eine ungenaue Regelung oder sogar ein Schwingen des Regelkreises zur Folge haben.

Mit einem Bypass im Kesselkreis kann der Regelbereich des Regelventils trotz unterschiedlichen Temperaturniveaus zwischen Hauptrücklauf- und Kesseleintrittstemperatur wesentlich erweitert werden (siehe Bild 7.3).

Bypässe sind in der Regel sinnvoll,

- wenn die Temperaturdifferenz zwischen Kesselaustritts- und Kesseleintrittstemperatur (T_12 – T_11 in Bild 7.3) um mehr als 10 K kleiner ist als die Temperaturdifferenz zwischen Kesselaustrittstemperatur und maximal zulässiger Hauptrücklauftemperatur (T_12 – T_43 in Bild 7.3). Das Regelventil kann dadurch kleiner ausgelegt und sein Regelbereich vollständig genutzt werden.
- wenn sichergestellt ist, dass die Hauptrücklauftemperatur T_43 in keinem Betriebsfall über den Auslegewert ansteigen kann. Nur dann ist sichergestellt, dass der Kessel seine Nennleistung in jedem Fall abgeben kann.

Die Auslegung des Bypass-Volumenstromes erfolgt folgendermassen: Bei Nennleistung und maximaler Hauptrücklauftemperatur soll der Volumenstrom über den Bypass des Mischventils annähernd null sein. Die Ventilstellung ist auf 100 % Durchgang eingestellt.

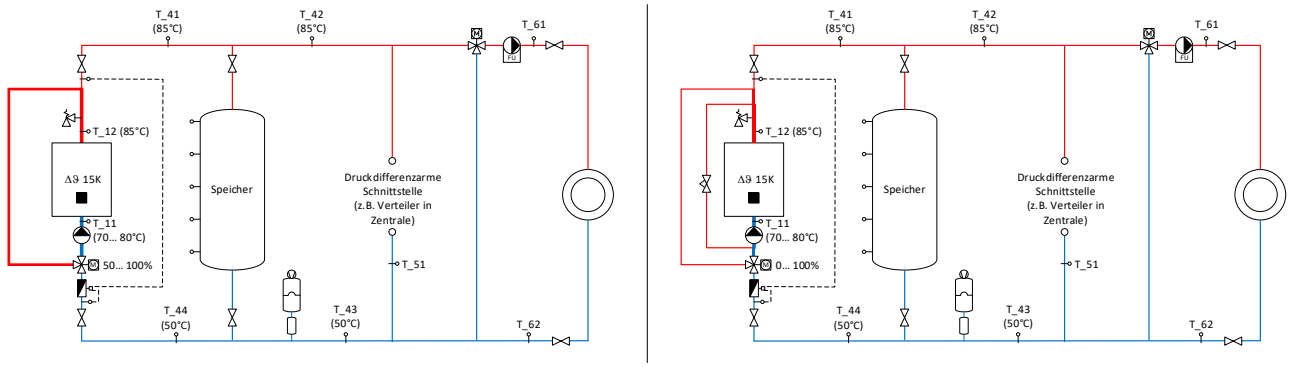


Bild 7.3 Hydraulische Einbindung des Kesselkreises ohne und mit Bypass.

7.3 Pumpen

7.3.1 Pumpenbauarten

Grundsätzlich wird unterschieden zwischen:

- **Trockenläufer**-Pumpe: Die Pumpe ist über Welle und Kupplung mit einem Normmotor verbunden.
  - Bei der Sockelpumpe sind Normmotor und Pumpe auf einen Sockel montiert.
  - Bei der Inline-Pumpe ist der Normmotor an eine Rohreinbaupumpe montiert.
- **Nassläufer**-Pumpe: Die Rohreinbaupumpe und der sogenannte Spaltrohrmotor bilden eine Einheit. Das geförderte Medium schmiert die Lager und kühlt den Motor. Der Antrieb erfolgt durch einen stufenlos drehzahlgesteuerten Gleichstrom-Synchronmotor mit Permanentmagnet-Rotor. Der Anwendungsbereich liegt aktuell bei einem maximalen Volumenstrom von 80 m^3/h.

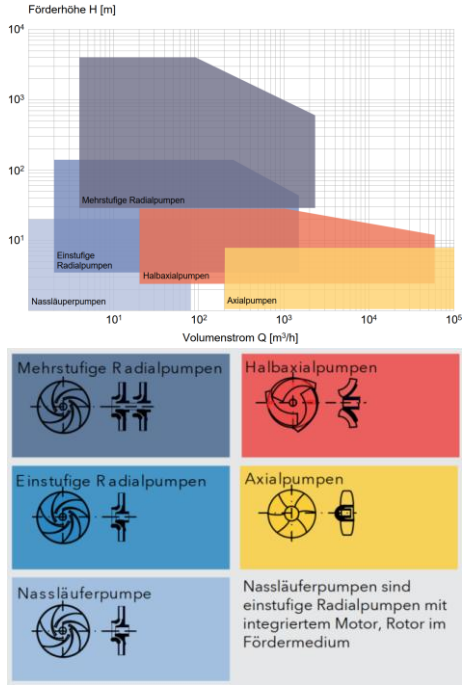


Bild 7.4 Typologie von Pumpen nach Förderhöhe und Volumenstrom. Eigene Grafik in Anlehnung an [72].

Stufenlos **drehzahlgesteuerte Kesselpumpen** gibt es in folgenden Ausführungen:

- Nassläufer-Pumpe mit stufenlos drehzahlgesteuertem Gleichstrom-Synchronmotor
- Trockenläufer-Pumpe mit Normmotor (Inline- oder Sockelpumpe) und externem Frequenzumformer
- Trockenläufer-Pumpe mit Normmotor (Inline- oder Sockelpumpe) und aufgebautem Frequenzumformer

7.3.2 Pumpenauslegung

Die Anwendung der Pumpenauslegungsprogramme der Pumpenhersteller ermöglicht es, verschiedene Pumpen für den vorgegebenen Einsatzbereich (Volumenstrom, Förderhöhe) bezüglich Energieeffizienz und Lebensdauerkosten zu vergleichen.

Die produktespezifischen Daten des Auslegungsprogramms (Pumpenkennlinie, Gesamtwirkungsgrad [Wirkungsgrad Pumpe plus Motor], Wirkungsgrad Pumpe) des Herstellers ermöglichen eine optimale Auswahl.

Damit die produktespezifischen Daten des Auslegungsprogramms überprüft oder verglichen werden können, sind folgende Grundlagen der Pumpentechnik zu beachten:

Pumpenkennlinie
Die Pumpenkennlinie zeigt die Förderhöhe (Druckdifferenz) in Abhängigkeit des Volumenstromes (Durchfluss). Es wird zwischen flachen Kennlinien von niedertourigen Pumpen und steilen Kennlinien von hochtourigen Pumpen unterschieden (siehe Bild 7.5). Kesselpumpen weisen flache Kennlinien auf, Fernleitungspumpen weisen steile Kennlinien auf.

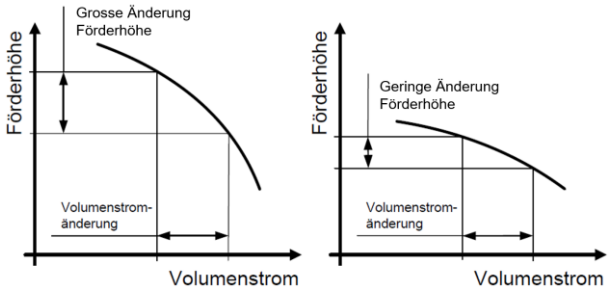


Bild 7.5 Steile (links) und flache Pumpenkennlinie (rechts).

Anlagenkennlinie
Der Druckverlust des Wärmenetzes steigt quadratisch mit dem Volumenstrom. Diese Abhängigkeit zwischen Förderhöhe und Volumenstrom wird in der Anlagenkennlinie dargestellt. Da auch die Pumpenkennlinie dieselbe Abhängigkeit zwischen Förderhöhe und Volumenstrom aufweist, lassen sich beide Kennlinien in dasselbe Koordinatensystem eintragen (Bild 7.6). Sie haben einen gemeinsamen Schnittpunkt. Dieser ist der Betriebspunkt der Pumpe, bei dem die Förderhöhe der Pumpe dem Druckverlust der Anlage entspricht.

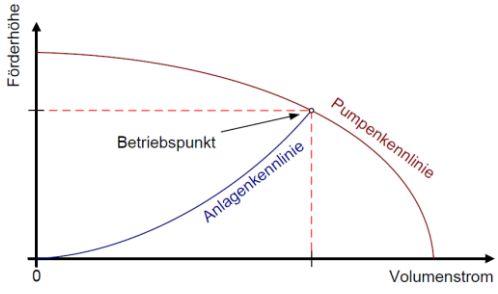


Bild 7.6 Pumpen- und Anlagenkennlinie [19].

Proportionalitätsgesetze
Bei der Änderung der Drehzahl einer Umwälzpumpe verhalten sich Förderhöhe, Volumenstrom und hydraulische Leistung entsprechend den folgenden drei Proportionalitätsgesetzen.

Der Volumenstrom verhält sich proportional zur Drehzahl der Pumpe:

$$\frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

Die Förderhöhe (Druckdifferenz) verändert sich mit dem Quadrat der Drehzahl:

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{\Delta p_1}{\Delta p_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2$$

Die hydraulische Pumpenleistung ändert sich mit der dritten Potenz der Drehzahl:

$$\frac{P_{hydr1}}{P_{hydr2}} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3$$

Bei halber Drehzahl sinkt also der Volumenstrom auf die Hälfte, die Förderhöhe, also der Druckabfall, sinkt auf ein Viertel und der Leistungsbedarf der Pumpe auf ein Achtel.

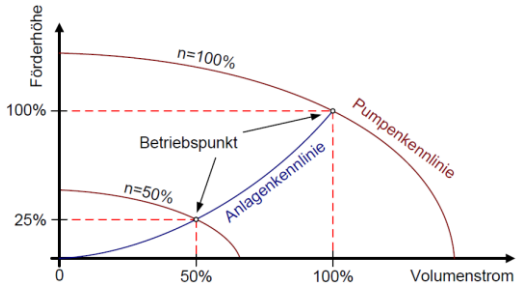


Bild 7.7 Pumpen- und Anlagenkennlinie für zwei verschiedene Drehzahlen [19].

Pumpenstromverbrauch, Pumpenwirkungsgrad, Energieeffizienz

Die Auswahl einer Umwälzpumpe ist eine Frage der hydraulischen Auslegung. Dabei muss auch der Pumpenstromverbrauch von Anfang an berücksichtigt werden. Dazu sind die geforderte Energieeffizienzklasse für den Elektromotor der Trockenläufer-Pumpen und die Energieeffizienz-Index(EEI)-Grenzwerte für Nassläufer-Pumpen einzuhalten (siehe auch Planungshandbuch Fernwärme [19] Kapitel 3.3.2).

Was ist zu beachten?

- Unnötig hohe Volumenströme vermeiden
- Möglichst flache Netzkennlinie
- Die Lage des Arbeitspunktes im Pumpendiagramm beeinflusst den Wirkungsgrad entscheidend. Das Optimum des Wirkungsgrades liegt in der Regel im mittleren Drittel der Kennlinie für die höchste Drehzahlstufe; es gibt aber auch Ausnahmen.
- Stufenlos drehzahlgesteuerte Pumpen nur in Kesselkreisen mit stark variablem Durchfluss einsetzen (siehe Kapitel 7.3.3). Gleichzeitig ist darauf zu achten, dass der Arbeitspunkt nicht allzu weit vom mittleren Drittel der Kennlinie für die maximale Drehzahlstufe entfernt liegt.
- Für drehzahlgesteuerte Pumpen sind, wenn möglich, Nassläufer-Pumpen mit Gleichstrom-Synchronmotoren mit Permanentmagnet-Rotor einzusetzen.

7.3.3 Drehzahlgeregelte Kesselpumpe

In der Regel wird der interne Kesselkreis der Holzkessel gemäss Vorgabe der Standardschaltungen mit konstantem Volumenstrom betrieben. Dies erleichtert die Regelbarkeit der Anlage, da nur das Dreiwegeventil angesteuert wird und eine drehzahlgeregelte Kesselpumpe nicht notwendig ist. Eine einstufige, optimal dimensionierte Kesselpumpe entspricht den Anforderungen eines energieeffizienten Pumpenbetriebs. Nassläufer-Pumpen mit stufenlos drehzahlgesteuertem Gleichstrom-Synchronmotor sind bei fest vorgegebenem Arbeitspunkt in Bezug auf Volumenstrom und Förderhöhe, also konstanter Drehzahl, zu betreiben.

Die Motivation für den Einsatz einer drehzahlgeregelten Kesselpumpe ist die Reduktion des Strombedarfs für den Pumpenbetrieb. Eine drehzahlgeregelte Kesselpumpe wird bei den folgenden Anwendungen eingesetzt:

- **Regelansatz für indirekte Leistungsvorgabe über Soll-Kessel(austritts)temperatur (Kesselkreis mit Dreiwegeventil für Rücklaufanhebung auf konstante Kesseleintrittstemperatur):**
  Hier handelt es sich um eine indirekte Leistungsvorgabe an den Holzkessel über die Soll-Drehzahl der Kesselpumpe bei konstanter Kesseleintrittstemperatur. Der Sollwert der Kesselleistung wird durch den Regler indirekt über die Kesselwassertemperatur vorgegeben. Dieser regelt auf eine konstante Soll-Kessel(austritts)temperatur.

  Aufgrund der Trägheit der indirekten Leistungsvorgabe ist dieser Regelansatz beim Einsatz eines Wärmespeichers mit direkter Vorgabe des Sollwerts der Feuerungsleistung durch die Regelung aufgrund des Speicherladezustands nicht zielführend.
- **Regelansatz für konstante Temperaturdifferenz über dem Kesselkreis (Kesselaustrittstemperatur minus Kesseleintrittstemperatur) (Kesselkreis mit Dreiwegeventil für Rücklaufanhebung auf konstante Kesseleintrittstemperatur):**
  Entsprechend der Vorgabe der Kesselleistung wird die Drehzahl der Kesselpumpe so geregelt, dass sowohl Kesselaustrittstemperatur als auch Kesseleintrittstemperatur beziehungsweise ihre Differenz konstant bleiben.

  Problematisch sind die Betriebsphasen Kesselstart, Ausbrand und Standby, in denen es kaum gelingt, die Kesselaustrittstemperatur konstant zu halten. Das Regelverhalten kann zusätzlich durch eine Schichtung des Kesselwassers bei geringem Volumenstrom beziehungsweise bei Teillast verschlechtert werden.

  Vereinfachter Regelansatz: Die Drehzahl der Kesselpumpe wird direkt in Abhängigkeit des Sollwerts der Kesselleistung vorgegeben. Der erforderliche Drehzahlbereich ist bei der Inbetriebnahme festzulegen respektive einzuregulieren. Die Kesselaustrittstemperatur kann jedoch grössere, unerwünschte Abweichungen aufweisen, wenn bei wechselnder Brennstoffqualität die Kesselleistung nicht mehr der vorgegebenen Kesselleistung entspricht.

- **Regelansatz bei Kesselkreis ohne Rücklaufanhebung (Kesselkreis ohne Dreiwegeventil):**
  Holzkessel kleiner Leistung können Kesselkonstruktionen aufweisen, die ohne Begrenzung der Kesseleintrittstemperatur nach unten auskommen beziehungsweise bei denen keine Anhebung der Kesseleintrittstemperatur notwendig ist.

  Die Drehzahl der Kesselpumpe wird so geregelt, dass die Kesselaustrittstemperatur unabhängig von der vorgegebenen Kesselleistung im gesamten Leistungsbereich (z. B. 50 % bis 100 %) konstant gehalten wird. Der Kessel wird entsprechend mit einem variablen Volumenstrom bei variabler Kesseleintrittstemperatur durchströmt.

  Auch hier wird die Regelgenauigkeit der Kesselaustrittstemperatur durch eine unerwünschte Schichtung des Kesselwassers im Kessel bei geringem Volumenstrom beziehungsweise bei Teillast eingeschränkt.

Wie die obigen Ausführungen zeigen, ist der Einsatz von drehzahlgeregelten Pumpen im Kesselkreis eines Holzkessels anspruchsvoll. Abweichungen der Kesselaustrittstemperatur stören die Temperaturschichtung im Wärmespeicher und können dadurch zu einem ungünstigen Regelverhalten der Anlage führen. Aus diesem Grund sind diese Regelansätze in den Standard-Schaltungen nicht aufgeführt.

Folgende zusätzliche regelungstechnische Anforderungen können gegebenenfalls notwendig sein:

- Die Betriebsphasen Start, Ausbrand und Standby erfordern zusätzliche Regel- oder Steuerfunktionen, speziell bei Holzkesseln mit schwerer Feuerraumauskleidung und hoher Trägheit.
- Beim Betrieb eines Holzkessels mit wechselnder Brennstoffqualität kann eine konstante Kesselaustrittstemperatur nur mit zusätzlichen Regelstrecken erreicht werden (z. B. unter Einbezug der momentanen mittleren Wärmeleistung am Wärmezähler unter Berücksichtigung der Totzeit des Kesselwasservolumens).

7.3.4 Betriebssicherheit und Redundanz der Kesselpumpe

Bei Warmwassersystemen mit einem maximalen Temperaturniveau des Heizungswassers von < 110 °C kann auf eine hydraulisch parallel eingebundene Ersatz-Kesselpumpe verzichtet werden, wenn die Kesselpumpe bei Bedarf mit kurzfristiger Beschaffungszeit auswechselbar ist. Falls eine Ersatzpumpe kurzfristig nicht verfügbar ist, sollte in Betracht gezogen werden, eine Ersatzpumpe auf Lager zu halten. **Hinweis**: Bei längerer Lagerzeit kann es sein, dass die Pumpe nicht mehr dem aktuellen Stand der Technik entspricht.

Bei Heisswassersystemen mit einem maximalen Temperaturniveau des Heizungswassers von > 110 °C geben die sicherheitstechnischen Vorgaben (Normen, gesetzliche Regelungen, siehe Kapitel 19) vor, ob eine hydraulisch parallel eingebundene Ersatz-Kesselpumpe erforderlich ist oder nicht.

7.4 Wärmezähler

Wärmezähler werden eingebaut, um die produzierte oder bezogene Wärmemenge zu erfassen. Im Weiteren ermöglichen sie die notwendige Betriebsdatenaufzeichnung der aktuellen Wärmeleistung für die Betriebsüberwachung und die Betriebsoptimierung, wie sie in den Standardschaltungen gefordert werden. Bei einer Qualitätsbegleitung nach QM Holzheizwerke wird der Einbau von Wärmezählern gefordert.

Der Einbau von Wärmezählern in einem Heizwerk ist an folgenden Stellen vorzusehen:

- Im Wärmeerzeugerkreis jedes einzelnen Wärmeerzeugers (Holzkessel, Economiser, Abgaskondensation, Wärmepumpe usw.)
- Bei jeder einzelnen Fernleitungsgruppe für die Erfassung der ins Netz eingespeisten Wärmemenge und deren Wärmeverteilverluste und zur Erfassung der Lastspitzen respektive Lastabsenkungen im Tagesverlauf
- Im Kesselkreis von Gas- und Ölkesseln wird der Einbau eines Wärmezählers empfohlen. Bei Verzicht müssen die Kessel zwingend über Betriebsstundenzähler und einen Öl-/Gaszähler verfügen (bei modulierendem Brenner hat der Öl-/Gaszähler den aktuellen Volumenstrom kontinuierlich zu erfassen).

Für die Abrechnung von Brennstofflieferungen oder der von einem Wärmeabnehmer bezogenen Wärme ist der Einsatz von geeichten Wärmezählern notwendig. Die Wärmemessung erfordert eine Durchflussmessung und eine Temperaturdifferenzmessung zwischen Vorlauf und Rücklauf.

7.4.1 Merkmale von Wärmezählern

Die **Genauigkeitsklasse** eines Wärmezählers ist durch die Messgenauigkeit von Durchfluss und Temperaturdifferenz bestimmt.

Der **Messbereich des Durchflusses** ist durch den Arbeitsbereich zwischen Nenndurchfluss q_p und Minimaldurchfluss q_i gegeben. Das Verhältnis von Nenndurchfluss zu Minimaldurchfluss ist ein Mass für die Bandbreite des Durchflussbereichs, innerhalb dessen eine bestimmte Genauigkeit der Volumenstrommessung garantiert ist. Bild 7.8 zeigt die Fehlerkurve eines Flügelradzählers, und Bild 7.9 zeigt die Fehlerkurve beim Schwingstrahl-Durchflussmessverfahren.

Der **Druckabfall bei Nenndurchfluss q_p** ist oft sehr hoch (20 bis 25 kPa für Flügelradzähler). Ein hoher Druckabfall vergrössert zwar den Arbeitsbereich und die Messgenauigkeit, er verschlechtert aber auch die Ventilautorität des Regelventils (siehe Kapitel 7.2.1), das sich oft in der gleichen Durchflussstrecke (variabler Volumenstrom des Kesselkreises) befindet.

Die **Wasserqualität** hat bei Langzeiteinsatz einen grossen Einfluss auf die Messgenauigkeit. Für die Durchflussmessung werden folgende Messverfahren verwendet:

- Magnetisch-induktive Durchflussmessung (MID)
- Durchflussmessung mit Ultraschall
- Durchflussmessung nach dem Schwingstrahlprinzip
- Mechanische Durchflussmessung mit Flügel- oder Turbinenrad

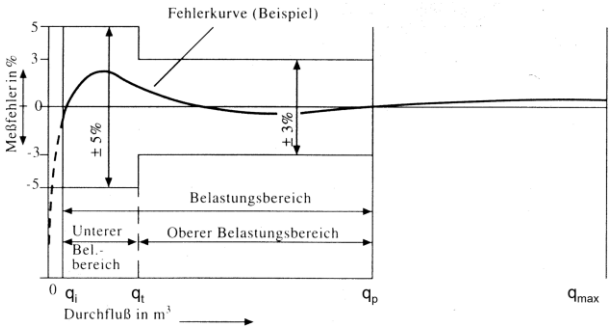


Bild 7.8 Fehlerkurve mechanisches Durchflussmessverfahren mit Flügelrad.

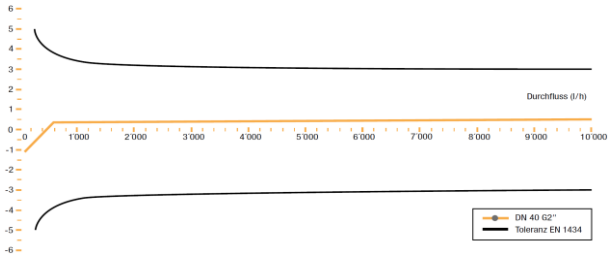


Bild 7.9 Fehlerkurve Schwingstrahl-Durchflussmessverfahren (Quelle: NeoVac Superstatic 440).

In Tabelle 7.1 ist eine Übersicht der verschiedenen Durchflussmessverfahren zu sehen. Die Durchflussmessverfahren MID, Ultraschall und Schwingstrahl weisen gegenüber mechanischen Durchflussmessverfahren (Flügel- oder Turbinenrad) eine höhere Messgenauigkeit auf (siehe auch Bild 7.8 und Bild 7.9).

Tabelle 7.1 Übersicht über die wichtigsten Durchflussmessverfahren.

Merkmal	MID[1)]	Ultraschall	Schwingstrahl	Mechanisch
Verhältnis q_p/q_i	100 - 150	100 - 150	25 - 100	25 - 100
Druckabfall bei Nenndurchfluss q_p in kPa	7 - 15	7 - 20	9 - 25	10 - 15
Messgenauigkeit	hoch	hoch	hoch	mittel
Empfindlichkeit der Messgenauigkeit auf die Wasserqualität	hoch	klein bis mittel[2)]	klein	klein
Abnützung/Serviceaufwand	gering	gering	gering	hoch
Empfindlichkeit der Messgenauigkeit auf elektrische Störfelder	hoch	gering	gering	gering bis mässig[3)]

[1)] Magnetisch-induktives Durchflussmessgerät

[2)] Verschmutzung der Umlenkspiegel bei kleinen Nennweiten

[3)] bei induktivem Impulsgeber

7.4.2 Anforderungen der einzelnen Durchflussmessverfahren

Grundsätzlich sind die Einbauvorschriften des Wärmezählerlieferanten zu beachten, und die geforderte Wasserqualität ist einzuhalten.

Magnetisch-induktive Durchflussmessgeräte

- Im Wasser soll kein Magnetit enthalten sein, da sich dieser auf den Messsonden absetzt und so die Messung beträchtlich beeinflusst (Reduktion des Durchflussmesswertes). Magnetit entsteht bei der Oxidation des im Wasser gebundenen Sauerstoffs mit den Eisenmolekülen der Rohrwandungen.
- Bei bestehenden Anlagen kann mit einem Magnetschlammabscheider in Verbindung mit einem Entgasungsgerät die geforderte Wasserqualität (klares Wasser) erreicht werden.
- Bei Neuanlagen ist darauf zu achten, dass von Anfang an das Wasser im Heizsystem ausreichend entgast wird, damit der Sauerstoffgehalt im Wasser gegen null reduziert wird.
- Beim Auftreten von grossen Messfehlern wird empfohlen, die Innenwände der Durchflussmesser zu reinigen. Die Ursache des Problems (schmutziges Wasser) ist damit allerdings nicht behoben.
- Um die optimale Strömungsgeschwindigkeit zu gewährleisten, ist der Wärmezähler im Regelbereich von minimalem und maximalem Volumenstrom (Teillast- und Volllastbetrieb) korrekt auszulegen.
- Da über die Messsonden eine sehr geringe Spannung anliegt (einige Millivolt), ist das Messverfahren empfindlich auf elektrische Störfelder. Das ist vor allem bei Splitgeräten der Fall, wo der Sensor und der Messumformer durch störungsempfindliche Leitungen verbunden sind. Dies kann durch Verwendung von Kompaktdurchflussgebern entschärft werden.
- Es wird empfohlen, nur abgeschirmte und verdrillte Kabel zu verwenden und die Nähe von starken Magnetfeldern von Elektromotoren oder Frequenzumrichtern zu vermeiden.

Ultraschall-Durchflussmessgeräte

- Verschmutzung der Umlenkspiegel bei kleiner Nennweite und Gaseinschlüsse im Wasser können Messungenauigkeiten verursachen.
- Die Vermeidung dieser Störeinflüsse erfordert eine hohe Wasserqualität sowie eine ausreichende Entgasung des Wassers, was Ablagerungen auf den Umlenkspiegeln verhindert.

Schwingstrahl-Durchflussmessgeräte

- Schwingstrahl-Durchflussmessgeräte sind grundsätzlich unempfindlich gegen Verschmutzung, da nur ein Teilstrom mit erhöhter Fliessgeschwindigkeit für die Messung notwendig ist.
- Beim horizontalen Einbau muss darauf geachtet werden, dass der Messkopf seitlich angebracht ist (nicht unten oder oben). Beim vertikalen Einbau sind keine besonderen Massnahmen zu beachten.

Mechanische Durchflussmessgeräte

- Der Einbau eines Schmutzfilters vor dem Wassereintritt des Durchflussmessers hilft Beschädigung oder Verstopfen des Flügel- bzw. Turbinenrads zu vermeiden.
- Regelmässige Revision sorgt dafür, mechanische Abnützungserscheinungen als Fehlerquelle auszuschliessen.
- Durch sorgfältige Auslegung ist dafür zu sorgen, dass der Betriebsdurchfluss möglichst nicht oder nur in seltenen Ausnahmefällen unter den Minimaldurchfluss q_i fällt.

7.4.3 Einbau von Wärmezählern

Zur Erreichung der für die Wärmeabrechnung erforderlichen Messgenauigkeit müssen folgende Hinweise beachtet werden:

- Einhalten der Einbauvorschriften des Wärmezählerlieferanten (Einlaufstrecke, Auslaufstrecke, Einbauanordnung horizontal/vertikal, Fühlereinbau usw.)
- Die geraden Ein- und Auslaufstrecken variieren je nach Nennweite und Technologie. Im AGFW-Arbeitsblatt FW 218 [73] wird eine Einlaufstrecke von 5 x DN und eine Auslaufstrecke von 3 x DN empfohlen. In diesen Beruhigungsstrecken (Ein-/Auslaufstrecken) dürfen sich keine Einbauteile wie Fühler, Tauchhülsen, Ventile, Schmutzfänger, Rohrbögen, Querschnittsveränderungen oder Ähnliches befinden (siehe Bild 7.10).
- Der Temperaturfühler für den Rücklauf ist in Fliessrichtung nach dem Volumenmessteil anzuordnen.
- Das Volumenmessteil ist möglichst zwischen zwei Absperrvorrichtungen zu platzieren. Dies erleichtert Wartungsarbeiten und den Zählertausch gemäss dem Eichturnus.
- Auslegung auf eine Temperaturdifferenz > 20 K. Temperaturdifferenz im Betrieb mindestens 3 K, das heisst, der Einbau eines Wärmezählers in den konstanten Kesselkreislauf ist unzulässig.
- Gleichmässige Temperaturverteilung über dem Rohrquerschnitt vor den Temperaturfühlern (nötigenfalls zusätzlicher Einbau eines statischen Mischers)
- Stabile Regelkreise; schwingende Regler (kleine/grosse Temperaturdifferenz oder sogar positive/negative Temperaturdifferenz) können beachtliche Messfehler verursachen.
- Fehlzirkulationen (inkl. Einrohrzirkulation) verhindern, welche die Wärmemessung beeinflussen können
- Wenn die Temperaturdifferenzmessung auf der gleichen Ebene erfolgt wie die Durchflussmessung, können Störungen durch ungewollte Fehlzirkulationen minimiert werden (Fehlzirkulation wird wenigstens korrekt gemessen).
- Betreiben des Wärmezählers nur im zulässigen Durchflussbereich q_p bis q_i
- Vorteilhaft sind Kompaktwärmezähler, weil Störeinflüsse auf die kurze Signalübertragung vom Sensor zum Messumformer und zum Rechenwerk praktisch ausgeschlossen sind.
- Fachtechnisch einwandfreie Inbetriebnahme der Wärmezähler und wenn nötig systematische Störquellensuche durch Fachleute
- Das Verlängern der Fühlerkabel ist nicht zulässig. Wärmezähler sind inklusive Fühler kalibriert und geeicht.
- Die jeweiligen Vorschriften zur Erhaltung der Messbeständigkeit (Nacheichung, Kalibrierung usw.) sind zu beachten.

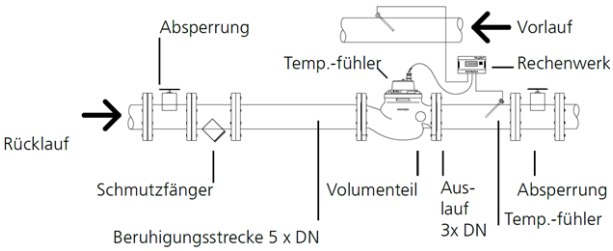


Bild 7.10 Installation Wärmezähler (Quelle: WDV-Molliné GmbH).

7.4.4 Beeinflussung der Ventilautorität

Wärmezählerhersteller geben zu jedem Wärmezähler den sogenannten Nenndurchfluss an. Wenn Wärmezähler tatsächlich auf diesen Nenndurchfluss ausgelegt werden, ergeben sich jedoch Druckabfälle von 20 bis 25 kPa.

Diese grossen Druckabfälle bei der irreführenden Bezeichnung «Nenndurchfluss» führen immer wieder zu Fehlauslegungen: Der Durchflusszähler wird nämlich oft in einer Strecke mit variablem Durchfluss eingebaut, damit die dazugehörende Temperaturdifferenz möglichst gross wird (beste Messgenauigkeit). Dies hat aber zur Folge – und das wird oft vergessen –, dass dadurch die Ventilautorität des Regelventils verschlechtert wird! Dies führt zu einem Zielkonflikt: Einerseits soll der Druckabfall über dem Zähler für eine gute Ventilautorität möglichst klein sein, andererseits bedeutet ein kleiner Druckabfall auch eine geringere Genauigkeit im unteren Durchflussbereich. Folgende Ratschläge können gegeben werden:

- Wenn kleinere Wärmezähler so ausgelegt werden, dass der tatsächliche Auslegedurchfluss etwa 50 % des Nenndurchflusses gemäss Herstellerangaben entspricht, ergeben sich vernünftige Druckabfälle um 5 kPa bei akzeptabler Genauigkeit.
- Mit den heute angebotenen unterschiedlichen Bauarten lassen sich immer geeignete Lösungen finden. Mit magnetisch-induktiven Durchflussgebern und Durchflussmessung mittels Ultraschalls (evtl. Durchflussmessung nach dem Schwingstrahlprinzip) können grössere Wärmezähler mit geringem Druckabfall realisiert werden.

7.5 Wärmespeicher

7.5.1 Wärmespeicher in der Heizzentrale

Holzfeuerungen können ihre Kesselleistung nicht beliebig schnell erhöhen oder senken; der Verbrennungsvorgang von Holz und die thermische Masse der Feuerungen schränken dies ein. In der Regel können die Leistungsänderungen höchstens im Bereich von 0.5 % bis 1 % pro Minute erfolgen. Die Aufgabe des Wärmespeichers in der Heizzentrale besteht darin, kurze und rasche Veränderungen des Leistungsbedarfs (Lastspitzen, Lastabsenkungen) der Wärmeabnehmer auszugleichen, damit die Holzfeuerung langsam dem mittleren Leistungsbedarf (Lastverlauf) folgen kann. Nur so können niedrige Emissionslevels, ein geringer Anlagenverschleiss und daraus resultierend niedrige Wartungskosten sowie eine lange Lebensdauer der Anlage sichergestellt werden. Damit der Speicher diese Aufgabe erfüllen kann, müssen folgende Voraussetzungen gegeben sein:

- Ausreichendes Speichervolumen
- Temperaturfühler zur Ermittlung des Speicherladezustands
- Gute Temperaturschichtung im Speicher
- Speicherlademanagement

Speichervolumen

Bei Anlagen, die mehrheitlich für die Erzeugung von Raumwärme genutzt werden, soll der Wärmespeicher mindestens die während einer Stunde bei Nennleistung der Holzfeuerung abgegebene Wärme aufnehmen können. Dabei wird die nutzbare Temperaturdifferenz zwischen dem Temperaturniveau oben und unten im Wärmespeicher berücksichtigt (siehe Bild 7.11). Das Temperaturniveau oben entspricht dabei der Kesselaustrittstemperatur, das Temperaturniveau unten entspricht der maximalen Rücklauftemperatur der Wärmeabnehmer im Auslegezustand bei kalter Witterung. Bei zwei oder mehr Holzfeuerungen wird als Bezugsgrösse mindestens zwei Drittel der Summe der Nennleistungen gewählt. Empfohlen wird aber auch bei Mehrkesselanlagen die Summe der Nennleistungen als Bezugsgrösse einzusetzen. Treten sehr grosse und/oder schnelle Laständerungen auf, zum Beispiel durch Prozesswärme, Warmwasserspitzen in Sportanlagen, Einsatz von Frischwasserstationen, Lüftungsanlagen, Gewächshäuser usw., soll das Speichervolumen deutlich erhöht werden. Weitere Hinweise sind auch im Kapitel 13.5.5 zu finden.

Falls das notwendige Speichervolumen durch Einschränkungen im Platzangebot und in der Raumhöhe nicht in einem einzigen Speicher realisiert werden kann, soll es auf zwei oder mehrere Speicher verteilt werden. In der Regel wird die hydraulisch serielle Betriebsweise der Speicher empfohlen, sofern die maximale Strömungsgeschwindigkeit in den Speichern 6 m/h bis 10 m/h nicht überschreitet. Die hydraulisch parallele Betriebsweise der Speicher verlangt eine sehr sorgfältige Verrohrung nach dem Tichelmann-Prinzip, sodass alle Leitungen zu den Speichern den exakt selben Druckabfall aufweisen. Dies wird in der Praxis nur selten korrekt umgesetzt. Bild 7.12 zeigt eine serielle Anordnung von zwei Speichern mit den empfohlenen Positionen der Temperaturfühler. Das Planungshandbuch Fernwärme [19] vertieft in Kapitel 2.10.4 Bauarten und Betriebsweisen von Wärmespeichern.

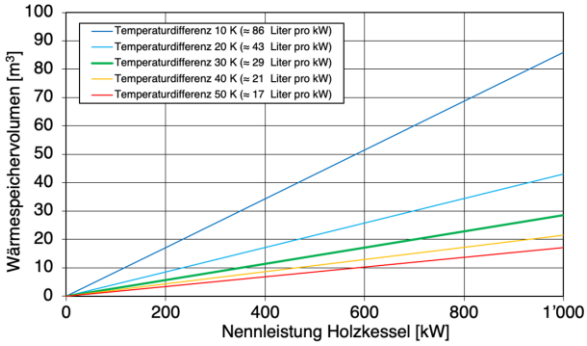


Bild 7.11 Volumen des Wärmespeichers in Funktion der Kesselnennleistung und der Temperaturdifferenz.

Temperaturfühler

Es sollen mindestens fünf Temperaturfühler gleichmässig über den Wärmespeicher verteilt angeordnet werden. Bei hohen Speichern sollen nach Möglichkeit 10 Temperaturfühler verwendet werden. Mit ihrer Hilfe wird der Ladezustand des Wärmespeichers ermittelt. Werden die Temperaturfühler über mehrere Speicher verteilt angeordnet, sollen mindestens fünf Temperaturfühler insgesamt, nach Möglichkeit bis zu fünf Temperaturfühler pro Speicher, verwendet und von der Regelung für die Berechnung des Ladezustandes interpretiert werden.

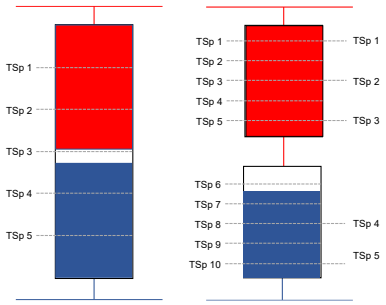


Bild 7.12 Empfohlene Anordnung von 5 Temperaturfühlern bei einem Speicher (links) und von zehn beziehungsweise fünf Temperaturfühlern bei zwei Speichern in Serie (rechts).

Temperaturschichtung

Der Wärmespeicher muss eine ausgeprägte Temperaturschichtung aufweisen. Dies erfordert einen hydraulischen Abgleich der Volumenströme der Wärmeerzeuger und der Wärmeabnahme bei kalter Witterung. Die Strömungsgeschwindigkeiten im Wärmespeicher sollen möglichst gering sein. Das Ein- und Ausströmen des Wassers soll keine Mischvorgänge im Wärmespeicher auslösen, was zum Beispiel durch den Einsatz von Lochblechen im Bereich der Ein-/Ausströmung erreicht werden kann. Bild 7.13 zeigt die Temperaturschichtung in

einem Wärmespeicher beim Laden und Entladen. Charakteristisch für eine gute Temperaturschichtung ist, dass die Temperaturfühler sich nicht alle gleichzeitig verändern, sondern dass ein Temperaturfühler nach dem anderen seine Temperatur verändert. Beim Entladen sinkt zuerst die Temperatur des untersten Fühlers. Beim Laden steigt die Temperatur des untersten Fühlers als letzte an.

Wichtig

Damit die Temperaturschichtung im Speicher erhalten bleibt, muss die Kesselaustrittstemperatur konstant gehalten werden, unabhängig von der momentanen Kesselleistung und auch beim Ausschalten und Zuschalten des Kessels. Dies erfordert eine Regelung der Kesselaustrittstemperatur auf einen konstanten Wert. Das erfolgt über eine entsprechende Vorgabe der Kesseleintrittstemperatur gemäss der gewünschten Kesselleistung. Durch das Anheben der Kesseleintrittstemperatur nach dem Ausschalten des Kessels knapp unterhalb der Kesselaustrittstemperatur kann diese während des Bereitschaftsbetriebs konstant gehalten werden.

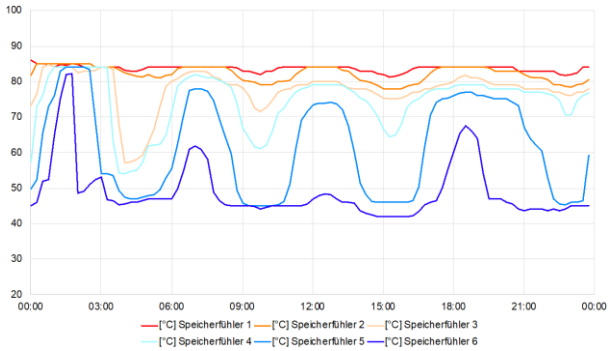


Bild 7.13 Zeitverlauf der Temperaturen im Wärmespeicher beim Laden und Entladen.

Speicherlademanagement

Der Wärmespeicher ist ein Indikator für Veränderungen des Leistungsbedarfs. Erhöht sich der Leistungsbedarf im Wärmenetz im Vergleich zur momentanen Leistung des Holzkessels, bewegt sich die kalte Schicht im Speicher langsam nach oben, wodurch der Ladezustand des Speichers abnimmt. Damit der Wärmespeicher das kurzfristige Erhöhen oder Absenken der Lastabnahme ausgleichen kann, muss er in der oberen Hälfte heiss und in der unteren Hälfte kalt sein. Er soll also einen Ladezustand um 50 % aufweisen. Ein PI-Regler vergleicht dazu den Ist-Wert und den Soll-Wert des Speicherladezustands. Er regelt den Speicherladezustand, indem er die Leistung der Holzfeuerung langsam erhöht oder vermindert (siehe Bild 7.14). Beim Erreichen des Soll-Ladezustandes wird die Kesselleistung auf Minimallast (z. B. 30 %) reduziert. Sind zwei Holzfeuerungen gleichzeitig in Betrieb, erhalten beide Kessel vom Speicherlademanagement die gleiche Leistungsvorgabe.

Für eine optimale Leistungsvorgabe an die Holzkessel durch den PI-Regler ist eine genaue Erfassung des Speicherladezustands erforderlich.

Zusätzliche Informationen sind in den Standard-Schaltungen Teil I und Teil II (Erfassung des Speicherladezustands Variante 1 bis 4) zu finden.

Im Zuge der Planung muss eine umfassende Funktionsbeschreibung der Anlage erstellt werden, die insbesondere auch eine Regelstrategie für das Speicherlademanagement enthält (siehe Kapitel 5.10.3). Bereits in den Ausschreibungen und Verträgen mit Planerinnen oder Planern und den Herstellern ist klar zu definieren, wer für die Definition und die Umsetzung des Speicherlademanagements zuständig ist.

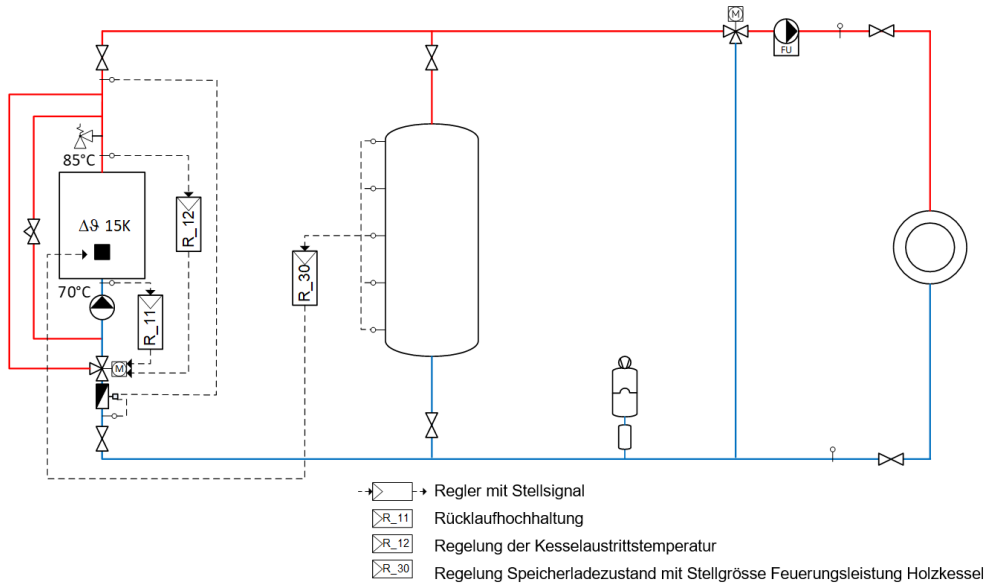


Bild 7.14 Regelung des Speicherladezustands mit Stellgrösse Feuerungsleistung Holzkessel.

7.5.2 Hydraulische Einbindung Wärmespeicher

Für eine problemlose hydraulische Einbindung von Wärmeerzeuger, Wärmespeicher und «drucklosen» Anschlüssen sollten diese in einer bestimmten Reihenfolge nahe beieinander angeordnet werden (Schaltung A gemäss Bild 7.15). Problematische Abweichungen zur obenstehenden Grundanforderung sind in den Schaltungen B – F mit Lösungshinweisen beschrieben (siehe Bild 7.16 bis Bild 7.20).

Die grundsätzlichen Probleme, die sich ergeben, wenn ein Wärmeerzeuger (Holzkessel, Wärmepumpe usw.), ein Speicher und ein «druckloser» Anschluss (Verteiler, Vorregulierung Fernleitung usw.) zusammengeschaltet werden, zeigen Bild 7.15 bis Bild 7.20.

Schaltung A
Diese Schaltung ist problemlos, weil der Druckabfall über dem Speicher gering ist. Erzeuger und Verbraucher sind hydraulisch einwandfrei entkoppelt (Bild 7.15).

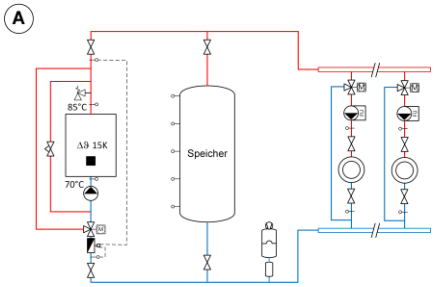


Bild 7.15 Hydraulische Einbindung Wärmespeicher – Schaltung A.

Schaltung B
Der Speicher ist weit entfernt vom Wärmeerzeuger und Verteiler aufgestellt (Bild 7.16). Der Druckabfall Δp über Fernleitung und Speicher bewirkt bei zu langer Speicheranschlussleitung eine unzulässig hohe Schwankung der Anschluss-Druckdifferenz des «drucklosen» Verteilers bei der Ladung und Entladung. Bei sorgfältiger Auslegung der Regelventile kann erfahrungsgemäss eine maximale Druckdifferenzschwankung von etwa 3 kPa verkraftet werden.

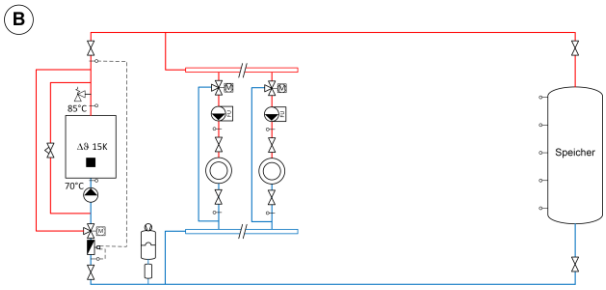


Bild 7.16 Hydraulische Einbindung Wärmespeicher – Schaltung B.

Schaltung C
Ein weit entfernter Verteiler bietet Schwierigkeiten, weil hier der «drucklose» Verteiler entsprechend dem Druckabfall über die lange Anschlussleitung und den Speicher druckbehaftet ist (Bild 7.17). Immerhin tritt hier, im Gegensatz zu Schaltung B, die Schwankung der Anschluss-Druckdifferenz nur in einer Richtung auf. Welche maximale Anschluss-Druckdifferenz verkraftet werden kann, ist wie folgt zu beantworten:

- Der Druckabfall über jedem Regelventil des Verteilers muss grösser sein als die Anschluss-Druckdifferenz (Ventilautorität ≥ 0.5); bei bestehenden Verteilern ist der Druckabfall über den Regelventilen erfahrungsgemäss selten grösser als 3 bis 5 kPa, also darf auch die Anschluss-Druckdifferenz sicher nicht grösser sein.
- Ferner darf der Druckabfall über der langen Anschlussleitung nicht grösser sein als 20 % der Förderhöhe der kleinsten Gruppenpumpe (Verhinderung der Störung der Gruppen am Verteiler untereinander).

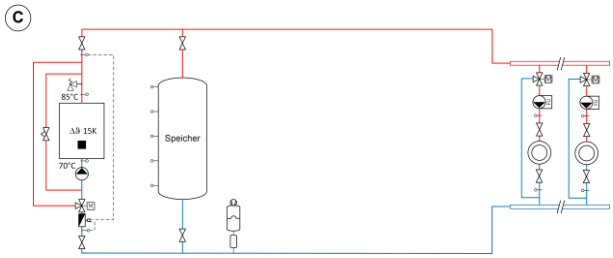


Bild 7.17 Hydraulische Einbindung Wärmespeicher – Schaltung C.

Schaltung D
Eine Fernleitungspumpe und ein Bypass im Verteiler sind leider keine Lösung, weil dadurch ein unzulässiges Hochmischen der Rücklauftemperatur erfolgt (Bild 7.18).

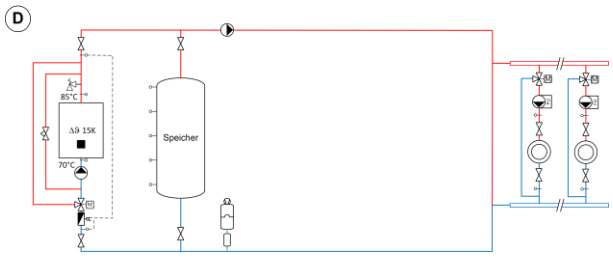


Bild 7.18 Hydraulische Einbindung Wärmespeicher – Schaltung D.

Schaltung E
Alternativ kann der Speicher möglichst nahe beim Verteiler aufgestellt werden; dann ist die Anschluss-Druckdifferenz des Verteilers genügend klein (Bild 7.19). Es muss jedoch darauf geachtet werden, dass das Regelventil des Wärmeerzeugerkreises möglichst nahe beim Wärmeerzeuger installiert wird (kleine Totzeit) und der Druckabfall über dem Regelventil mindestens gleich gross ist wie der Druckabfall über Fernleitung und Speicher (Ventilautorität ≥ 0.5).

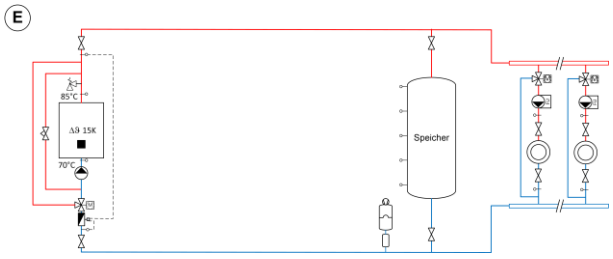


Bild 7.19 Hydraulische Einbindung Wärmespeicher – Schaltung E.

Schaltung F
Eine Lösung, die immer funktioniert, ist ein Einspritzverteiler mit Durchgangsventilen, verbunden mit einer drehzahlgesteuerten Fernleitungspumpe (Bild 7.20). Regelungstechnisch am günstigsten ist es dabei, wenn die Druckdifferenzmessung möglichst nahe am Verteiler erfolgt, weil dieser Sollwert die Ventilautorität der Regelventile bestimmt. Ausdrücklich nicht empfohlen wird der Versuch, einen «drucklosen» Verteiler auf Δp = 0 regeln zu wollen. Eine Regelung auf Δp < 10 kPa ist kaum machbar, weil das für einen «drucklosen» Verteiler einfach zu viel ist.

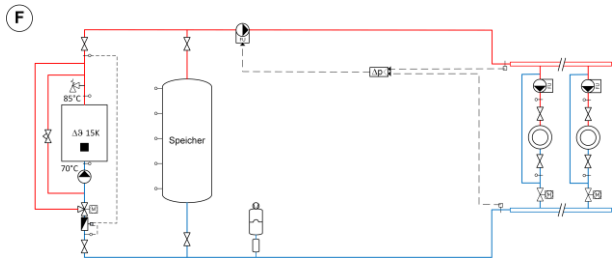


Bild 7.20 Hydraulische Einbindung Wärmespeicher – Schaltung F.

Zusatzvariante hydraulische Einbindung Speicher mit Netztrennung Wärmeerzeugung/Fernwärmenetz
Eine Netztrennung zwischen Wärmeerzeugung und Wärmenetz ist erforderlich, wenn hohe Drücke im Fernwärmenetz, verursacht durch grosse geodätische Höhenunterschiede, nicht auf die hydraulische Einbindung der Wärmeerzeugung mit Speicher übertragen werden können (Bild 7.21). Dabei ist zu beachten, dass die Grädigkeit (Temperaturdifferenz) über die beziehungsweise den Wärmeübertrager zwischen der primärseitigen Rücklauftemperatur der Wärmeerzeugung und der sekundärseitigen Rücklauftemperatur des Fernwärmenetzes in jedem Betriebspunkt maximal < 5 K beträgt. Ziel ist es, eine Grädigkeit < 3 K einzuhalten, damit die Speicherkapazität nicht durch eine erhöhte primärseitige Rücklauftemperatur für die Wärmeerzeugung verringert wird.

Bei zu geringem Volumenstrom durch den Wärmeübertrager steigt die Grädigkeit durch ein stark vermindertes Wärmeübertragungsverhalten aufgrund des Betriebes im laminaren Strömungsbereich stark an. Die Leistungsaufteilung auf die einzelnen Wärmeübertrager hat deshalb so zu erfolgen, dass in jedem Betriebspunkt eine turbulente Durchströmung der aktuell in Betrieb befindlichen Wärmeübertrager gewährleistet wird.

Im Weiteren ist regelungstechnisch sicherzustellen, dass beim Zu- und Wegschalten von Wärmeübertragern auf der Primärseite (Wärmeerzeugung) keine kurzfristigen Lastspitzen oder Lastabsenkungen entstehen. Dies erfolgt zum Beispiel durch Hochfahren eines zusätzlichen Wärmeübertragers auf Nennübertragungsleistung, während der bereits in Betrieb stehende Wärmeübertrager parallel dazu weiter mit Nennübertragungsleistung betrieben wird und beide Wärmeübertrager erst bei zu hoher Übertragungsleistung gemeinsam zurückgeregelt werden. Entstehende Lastspitzen oder Lastabsenkungen müssten zusätzlich durch den Speicher ausgeglichen werden. Die Wärmeübertragung Fernwärmenetz/Wärmeerzeugung hat so zu erfolgen, dass der Lastverlauf primärseitig (Wärmeerzeugung) identisch mit dem Lastverlauf sekundärseitig (Wärmenetz) ist.

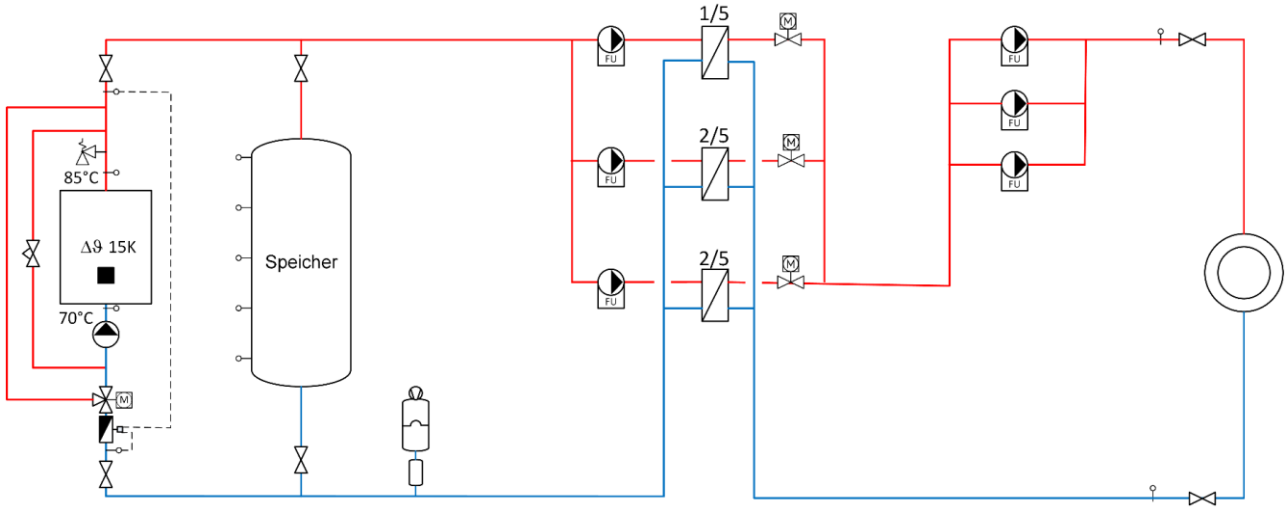


Bild 7.21 Netztrennung Wärmeerzeugung/Fernwärmenetz mit drei Wärmeübertragern.

7.6 Fragen zur Hydraulik der Wärmeerzeugung

7.6.1 Wasserqualität

Der Qualität des Wärmeträgers Wasser ist im hydraulischen System der Heizzentrale und des Wärmenetzes aus folgenden Gründen grosse Beachtung zu schenken:

- Verhinderung von Korrosion: Der Sauerstoffgehalt darf den in den Richtlinien und Normen festgelegten Grenzwert nicht überschreiten. Durch **systematisches Entgasen des Heizwassers im Betrieb mit einem Entgaser** kann in der Regel ohne chemische Zusätze der Sauerstoffgehalt unter den Grenzwert reduziert werden. Bei zu hohem Sauerstoffgehalt sinkt auch der pH-Wert unter den Grenzwert und das Auftreten von schwarzen Magnetitteilchen weist auf Korrosionsprozesse hin.
- Verhinderung von Kesselstein: Liegt die Gesamthärte respektive der Calciumkarbonatgehalt über dem Grenzwert, so bildet sich Kesselstein an den Wärmeübertragerflächen (Kesselflächen) der Wärmeerzeuger. Bei starker Kesselsteinbildung kann dies eine örtliche Überhitzung (hot spots) bewirken, da Kesselstein den Wärmeübergang oder den Durchfluss von Heizwasser behindert. Dadurch kann die Wärmeübertragerkonstruktion (Kesselkonstruktion) beim Auftreten einer starken Kesselsteinbildung Schaden nehmen.
- Die **Erstfüllung und Nachspeisung des hydraulischen Systems der Heizzentrale und des Wärmenetzes hat mit aufbereitetem Wasser** gemäss den landesweiten Richtlinien und Normen und den Vorgaben des Kesselherstellers zu erfolgen.
- Eine **jährliche Überprüfung der Heizwasserqualität**, bei der alle Grenzwerte entsprechend den Richtlinien und Normen mittels Wasseranalyse kontrolliert werden, ist notwendig, um eine konstant hohe Wasserqualität zu gewährleisten.

Die **Anforderungen** an das Kreislaufwasser unterscheiden sich grundsätzlich je nach der Betriebstemperatur. Es wird unterschieden zwischen Warmwasser < 110 °C und Heisswasser > 110 °C. Bei Heisswasser wird zudem zwischen einer salzarmen und einer salzhaltigen Betriebsweise unterschieden. Die Anlagengrösse, das Wasservolumen sowie Richtwerte und Anforderungen der Komponentenhersteller (Armaturen, Regelventile, Wärmeübertrager usw.) müssen dabei ebenfalls berücksichtigt werden.

Vertiefte Angaben zur Wasserqualität und zu den Anforderungen sind im Planungshandbuch Fernwärme zu finden (siehe [19] Seite 93 ff.). Eine umfassende Darstellung liefert auch das AGFW-Regelwerk FW 510 [74] oder die SWKI-Richtlinie BT102-01 [75]. Grundsätzlich sind die jeweiligen nationalen Normen und Richtlinien bezüglich der Wasserqualität in Heizungsanlagen und Fernwärmenetzen und auch die Herstellervorgaben einzuhalten.

7.6.2 Vermeidung von Fehlzirkulation

Ausgeschaltete Wärmeerzeuger (Holzkessel, Öl-/Gaskessel usw.) sind von der Gesamtwärmeerzeugung hydraulisch zu trennen, sodass Fehlzirkulationen vermieden werden können, welche den entsprechenden Wärmeerzeuger auf Betriebstemperatur halten respektive unerwünschte Wärmeverluste zur Folge haben.

Folgende Massnahmen sind umzusetzen:

- Kontrolliertes Schliessen des Dreiweg-Regelventils im Wärmeerzeugerkreis.
- Einbau von automatischen Absperrarmaturen in der Strecke mit variablem Volumenstrom des Wärmeerzeugerkreises.
- Verhinderung von Einrohrzirkulation durch Rückschlagklappen.

8 Komponenten der Wärmeverteilung

8.1 Überblick

Kapitel 8 gibt für thermische Netze einen Einblick in die Grundlagen der Wärmeverteilung und der Wärmeübergabe an die Kundinnen und Kunden. Es werden folgende Themen behandelt:

- Rohrsysteme
- Armaturen
- Leckageüberwachung
- Datenübermittlung und Kommunikation
- Netzaufbau
- Verlegemethoden und -situationen
- Wasserqualität
- Wärmeübergabe

Die oben aufgeführten Themen werden aber nicht vertieft behandelt. Für genauere Betrachtungen wird auf das Planungshandbuch Fernwärme [19] und auf den Leitfaden zur Planung von Fernwärme-Übergabestationen [76] verwiesen. Als weitere Literatur können zum Beispiel das Lehrbuch District Heating and Cooling [77] oder Unterlagen von entsprechenden Landesverbänden (wie z. B. AGFW oder VFS) empfohlen werden. In der Planung und im Betrieb sind zudem unternehmens- und länderspezifische Vorgaben zu beachten, die im vorliegenden Planungshandbuch nicht weiter behandelt werden.

8.2 Rohrsysteme

Beim Bau von Nah- und Fernwärmenetzen werden fast ausschliesslich vorisolierte Rohre eingesetzt, die meist im Erdreich verlegt werden. Die vorisolierten Rohre bestehen aus einem Mediumrohr, in dem das Wärmeträgermedium geleitet wird, Dämmmaterial, das den Wärmeverlust an die Umgebung reduziert, und einem Mantelrohr, das vor mechanischer Beschädigung schützt. Meistens sind in die Dämmung des Rohres noch zusätzliche Elemente wie zum Beispiel Datenleitungen oder Leckwarnsysteme integriert. Die Wahl des Rohrsystems und der geeigneten Verlegetechnik hängt neben der Netztemperatur und dem Netzdruck von Anforderungen ab, die wie folgt von den Standortbedingungen abhängig sind:

- Werkleitungen
- Umgebung
- Bauten
- Strassen
- Gleise
- Unterquerungen
- Grundwasser
- Bodenbeschaffenheit
- Baumbestand.

Vorisolierte starre Kunststoff-Verbundmantelrohre (KMR) mit einem Mediumrohr aus Stahl sind aufgrund der Standardisierung, der Robustheit und des geringen Materialpreises das meistverlegte Rohrsystem. Daneben kommen hauptsächlich im Bereich der Unterverteilung und Hausanschlussleitungen auch flexible Rohrsysteme wie Kunststoffmediumrohr (PMR) und Metallmediumrohr (MMR) zum Einsatz. Weitere mögliche Rohrsysteme sind Stahlmantel- und GFK-Rohre (siehe [19] Seite 68 ff.).

Für die Rohrsysteme KMR, MMR und PMR sind im unteren Nennweitenbereich auch **Doppelrohrausführungen**, sogenannte Duo-Rohre, erhältlich. Für spezielle Anwendungen kann das Stahlmantel- oder das GFK-Rohr ebenfalls in Doppel- oder Mehrfachrohrausführung ausgeführt werden. Doppelrohr- und Mehrfachrohrsysteme haben folgende Vorteile gegenüber Einzelrohrsystemen:

- Niedrige Verlegekosten (geringere Grabenbreite)
- Geringere spezifische Wärmeverluste
- Halbierte Anzahl Muffenverbindungen
- Halbierte Anzahl Kernlochbohrungen und Mauerdichtungen für die Hauseinführung
- Geringere Anzahl Dehnschenkel.

Doppelrohre mit MMR oder PMR eignen sich besonders für das Verlegen von Haus zu Haus, da keine Abzweiger im Erdreich realisiert werden müssen. Beim Einsatz von Doppelrohren mit KMR müssen die Abzweigungen genau bekannt sein, damit die erforderlichen Formstücke eingesetzt werden können. Ein nachträglicher Einbau einer Abzweigung ist mit hohem Aufwand verbunden. Die Leitungsführung muss präzis ausgehoben werden, da KMR-Doppelrohre sehr steif sind. Interessant sind KMR-Doppelrohre bei geraden Transportleitungen ohne Abzweiger und konstanter Neigung der Leitungstrasse. Bei Unterstossungen (speziell bei grösseren Distanzen) kann ein Doppelrohr mit geringem Durchmesser verlegt werden.

Eine Übersicht zu den einzelnen Rohrsystemen und deren Einsatzbereich ist in Tabelle 8.1 zu finden.

8.3 Armaturen

Armaturen werden als Absperrungen eingebaut. So lässt sich bei späteren Netzerweiterungen und eventuell notwendigen Reparaturen die Unterbrechung des Netzbetriebs eingrenzen. Zudem werden Armaturen zum Entleeren und Entlüften der Leitungen eingesetzt. Folgende Anforderungen werden an die Armaturen gestellt:

- Geringer Druckverlust
- Dichter Abschluss in beide Richtungen
- Dichtheit der Gehäusedurchführungen
- Geringer Wartungsaufwand
- Geringer Platzbedarf
- Geringe Fliessgeräusche
- Austauschbarkeit
- Dämmbar (thermisch)
- Zähigkeit des Gehäusewerkstoffes
- Funktionalität auch bei seltener Anwendung.

Einzelne Anforderungen beeinflussen sich gegenseitig, sodass nicht alle gleichzeitig erfüllt werden können und die wichtigsten Kriterien nach Bedarf festgelegt werden müssen. Zu beachten ist, dass Absperrarmaturen für Regelzwecke ungeeignet sind. In Nah- und Fernwärmenetzen werden je nach Nennweite, Temperatur- und Druckverhältnissen die vier Grundtypen Schieber, Ventile, Hähne und Klappen eingesetzt. Der Einbau der Armaturen in die Leitung erfolgt entweder durch Einschweissen oder mittels Flanschverbindungen.

Im Planungshandbuch Fernwärme wird vertieft auf die Armaturen eingegangen (siehe [19] Seite 75 ff.).

Tabelle 8.1 Übersicht der Rohrsysteme [19].

Rohrsystem	Anwendungsbereich				Lieferbare Längen			
	Maximal zulässige Betriebstemperatur	Dauerbetriebstemperatur	Nenndruck PN	Nenndurchmesser DN	Stangen	Rollen	Doppelrohr-Ausführung bis DN	Besonderheit
	°C	°C	bar	–	m	m	–	–
KMR	< 160	< 140	< 25	20 - 1'000	6/12/16*	–	DN 150	Aufgrund seiner Standardisierung und Robustheit das am häufigsten eingesetzte Rohrsystem
MMR	< 180	< 160	< 25	20 - 150	12*	< 1'000	DN 50	Relativ teuer; Anwendung, wenn es die Verlegebedingungen notwendig machen
PMR	< 95	< 80	< 6	20 - 150	12*	< 780	DN 65	Relativ günstig; eingeschränkte Druck- und Temperaturbeständigkeit. Zum Teil massive Einschränkung der Lebenserwartung, wenn die maximal zulässige Betriebstemperatur überschritten wird. Unter 70 °C Dauerbetriebstemperatur ist eine Lebenserwartung bis zu 100 Jahre möglich.
GFK	< 160	< 160	< 16	25 - 1'000	6*	–	–	Relativ teuer; nur bei besonderen Anforderungen an die Korrosionsbeständigkeit
SMR	< 400	< 400	< 64	25 - 1'200	16*	–	**	Relativ teuer; nur wenn die Druck-, Temperatur- oder Verlegebedingungen es notwendig machen.

KMR = Starres Kunststoffmantelrohr mit einem Mediumrohr aus Stahl
MMR = Flexibles Kunststoffmantelrohr mit einem Mediumrohr aus Stahl (gewellt oder glatt)
PMR = Flexibles Kunststoffmantelrohr mit einem Mediumrohr aus Kunststoff (z. B. PEX)
GFK = Starres Kunststoffmantelrohr mit einem Mediumrohr aus glasfaserverstärktem Kunststoff
SMR = Starres Stahlmantelrohr mit einem Mediumrohr aus Stahl
* Standardlänge/n, andere Längen auf Anfrage lieferbar.
** Sonderausführungen auf Anfrage möglich (z. B. Mehrfachrohrausführung).

8.4 Leckageüberwachung

Fernwärmenetze können je nach Verlegetechnik und Rohrsystem mit oder ohne Einrichtungen zur Leckageüberwachung ausgeführt werden. Die betrieblichen Erfahrungen haben gezeigt, dass eine kontinuierliche Überwachung mit zentraler Leckortung die Versorgungssicherheit eines Netzes erhöht und dadurch eine zeitliche und wirtschaftliche Beeinträchtigung durch Schäden kleinhalten kann. Aus diesem Grund wird grundsätzlich eine Einrichtung zur Leckageüberwachung empfohlen. Die Überwachung des Fernwärmenetzes sollte kontinuierlich an dafür vorgesehenen Messpunkten erfolgen.

Die Leckageüberwachung gilt bei Kunststoffmantelrohren mit Stahlrohren (KMR und MMR) als Stand der Technik [78]. Bei Kunststoffmediumrohren (PMR) ist in der Regel die Leckageüberwachung nicht standardmässig erhältlich. Bei der Kanalverlegung wird die visuelle Schachtkontrolle als ausreichend angesehen, gegebenenfalls sind automatische Einrichtungen zur Schachtüberwachung zu verwenden. Freileitungen werden in der Regel ohne Überwachungssysteme betrieben.

Die heute angewandten Leckageüberwachungssysteme messen entweder den elektrischen Widerstand der Wärmedämmung zwischen zwei Adern oder zwischen einer Ader und dem Mediumrohr (Messung im laufenden Betrieb bei > 1 MOhm). Bei einer Durchfeuchtung der Wärmedämmung oder des Indikators sinkt der Widerstand. Durch die Verwendung von zwei Adern kann eine Überwachungsschleife gebildet werden. Die Überwachung dieser Schleife stellt sicher, dass der ganze Kreis überwacht wird. Bei der Auswahl des Leckageüberwachungssystems ist darauf zu achten, dass das Messprinzip eine frühe Erkennung von Schäden, zum Beispiel

Feuchtigkeitseintritt in die Dämmung aufgrund von Schäden am Aussenmantel oder am Mediumrohr der Fernwärmerohre, sowie deren genaue Ortung ermöglicht, damit frühestmöglich mit den Instandhaltungsarbeiten begonnen werden kann. Die Leckagemessung ist in die Leittechnik, Visualisierung und laufende Datenaufzeichnung zu integrieren.

Im Planungshandbuch Fernwärme wird die Leckageüberwachung vertieft behandelt (siehe [19] Seite 73 ff.). Es werden drei verschiedene Systeme vorgestellt (Nordisches System, Brandes- und Indikator-System) und anhand diverser Kriterien miteinander verglichen (Fühleradern, Messverfahren, Fehlererfassung, Anzeigetoleranz, Überwachungsmöglichkeit und Länge der Überwachungsabschnitte).

8.5 Datenübermittlung und Kommunikation

Bei der Realisierung von Fernwärmesystemen gehört heute die Integration von Daten- und Leckageüberwachungssystemen zum Stand der Technik und sollte überall unabhängig von der Anlagegrösse ausgeführt werden. Die Vorteile sind die Möglichkeit einer einfachen, sicheren und effizienten Fakturierung, einer zentralen Störungserfassung sowie die Möglichkeit, Kundenanlagen zu optimieren und auf Mängel hinweisen zu können (z. B. Abdriften der primären Rücklauftemperatur).

Die Steuerung beziehungsweise Regelung der Wärmekunden durch Einzelregler ist für kleinere Anlagen die einfachste Lösung. Bei mittleren und grösseren Anlagen ist auch eine zentralisierte Überwachungsmöglichkeit in Betracht zu ziehen (z. B. Leitsystem oder Fernauslesung). Durch den ständigen Datenaustausch werden die Abläufe im gesamten Fernwärmenetz transparent gemacht und das Fernverstellen aller Anlageparameter jeder einzelnen Übergabestation ist möglich. Von jedem beliebigen Ort aus (z. B. per Notebook oder Mobiltelefon) können die Wärmekunden bei der Einstellung der Anlagen unterstützt werden. Durch die Erfassung der einzelnen Wärmezähler und Messdaten-Übertragung auf ein Zentralgerät erübrigt sich auch das Ablesen der Zählerstände vor Ort.

8.6 Netzaufbau

Der Begriff Fernwärmenetz oder Wärmeverteilnetz bezeichnet das Bindeglied zwischen Wärmeerzeugung und Wärmeabnehmer. Die Wahl von Netzstruktur, Trassenführung, Rohrsystem und Verlegemethode wird durch zahlreiche Faktoren beeinflusst. Nebst der Siedlungsstruktur bilden technische, geologische, ökonomische und sicherheitstechnische, aber auch architektonische und juristische Aspekte wichtige Entscheidungskriterien. Das Einzugsgebiet und die Grösse eines Wärmeverteilnetzes stehen meist nicht von vornherein fest, sondern entwickeln sich mit der Zeit.

Das Wärmeverteilnetz wird in der Regel in Haupt-, Zweig- und Hausanschlussleitungen unterteilt (siehe Bild 8.1). Die Hauptleitung entspricht der ersten Leitung ab der Wärmezentrale. Daneben wird auch der Begriff Stammleitung oder bei grossen Wärmeerzeugern, die weit weg von den Versorgungsgebieten liegen, auch der Begriff Transportleitung verwendet. Zweigleitungen oder auch Verteilleitungen zweigen von den Hauptleitungen ab und dienen der Unterverteilung zu den einzelnen Versorgungsgebieten. Die Hausanschlussleitungen dienen zum Anschluss eines Wärmeabnehmers an eine Haupt- oder Zweigleitung.

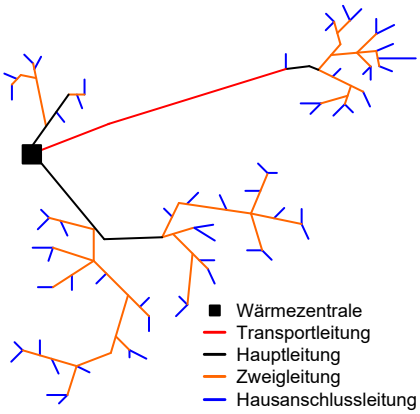


Bild 8.1 Netzaufbau und Leitungstypen [19].

Wärmeverteilnetze werden fast ausschliesslich als geschlossene **Zweileiter-Systeme** ausgeführt (eine Vor- und eine Rücklaufleitung). Eher selten werden sie als **Dreileiter- oder Vierleiter-Systeme** mit mehreren Vor- und Rücklaufleitungen ausgeführt, welche zum Beispiel auf unterschiedlichen Temperaturniveaus betrieben werden.

Neben der Unterscheidung nach der Anzahl der Leitungen wird die **Struktur des Wärmeverteilnetzes** durch die Anzahl der Wärmezentralen sowie die Anzahl und Lage der einzelnen Versorgungsgebiete beeinflusst. Je nach Situation und Entwicklung des Wärmeverbundes weist das Wärmeverteilnetz eine Baumstruktur, einen Ringschluss oder eine Masche auf.

Bei der **Unterverteilung** und dem Anschluss der Wärmeabnehmer wird grundsätzlich zwischen der Standard-Trassenführung, der Haus-zu-Haus-Trassenführung und der Einschleif-Trassenführung unterschieden.

Im Planungshandbuch Fernwärme wird der Netzaufbau detailliert beschrieben (siehe [19] Seite 73 ff.).

8.7 Verlegemethoden und Verlegesituationen

Die Verlegung der Leitungen erfolgt grundsätzlich nach folgenden **Methoden**:

- Oberirdisch auf Sockeln oder Pendelstützen
- Unterirdisch in Kanälen
- Unterirdisch im Graben
- Unterirdisch mit grabenlosen Verfahren
- Spezialfälle (Düker, Brücken usw.)

Die Verlegemethode ist von unterschiedlichen Faktoren abhängig. Die wichtigsten sind das eingesetzte Rohrsystem und die Situation vor Ort. Häufig anzutreffende **Verlegesituationen** sind:

- Befestigte (öffentlicher Strassenbereich, urbane Gebiete usw.) oder unbefestigte Oberflächen (ländliche Gebiete, Kulturland usw.)
- Leitungsführung an markanten Geländeabschnitten und Infrastrukturbauten (Bahnlinien, Brücken, Wasserläufe, Autobahnen usw.)
- Berücksichtigung anderer leitungsgebundener Sparten (Strom-, Gas- oder Wasserleitungen)
- Nachträglicher Anschluss an bestehende Leitungen

Je nach Situation müssen entsprechende Vorschriften, Berechtigungen, Konzessionen usw. berücksichtigt respektive eingeholt werden. Nicht zu unterschätzen sind der langfristige Betrieb und die Sicherheit der installierten Leitung, welche je nach Situation in einer Risikoanalyse bei der Planung zu berücksichtigen sind.

Auf den **Tief- und Rohrleitungsbau** wird im vorliegenden Planungshandbuch nicht eingegangen. Es wird an dieser Stelle auf das Planungshandbuch Fernwärme verwiesen, welches diese Themen ausführlich behandelt (siehe [19] Seite 73 ff.).

8.8 Wasserqualität im Wärmenetz

Um Schäden durch Korrosion, Erosion oder Werkstoff-Überbeanspruchungen in den Anlagen zu vermeiden, muss das Kreislaufwasser im Wärmeverteilnetz und beim Wärmekunden bestimmte Anforderungen erfüllen.

Vertiefte Angaben zur Wasserqualität und zu den Anforderungen sind im Kapitel 7.6.1 und im Planungshandbuch Fernwärme zu finden (siehe [19] Seite 93 ff.). Eine umfassende Darstellung liefern auch [74] und [75]. Grundsätzlich sind die jeweiligen nationalen Normen und Richtlinien bezüglich der Wasserqualität in Heizungsanlagen und Fernwärmenetzen und die Herstellervorgaben einzuhalten.

8.9 Wärmeübergabe

8.9.1 Anschluss von Wärmekundinnen und -kunden

Die Hausanlage der Wärmekundschaft kann auf zwei Arten an das Fernwärmenetz angeschlossen werden:

- Direkter Anschluss ohne zwischengeschalteten Wärmeübertrager
- Indirekter Anschluss mit zwischengeschaltetem Wärmeübertrager

Beim **direkten Anschluss** wird die Hausanlage vom Wärmeträger aus dem Fernwärmenetz durchströmt. Bei der Materialauswahl ist die chemische Beschaffenheit des Wärmeträgers zu beachten. Liegt der Netzdruck über dem zulässigen Druck der Hausanlage, so ist der direkte Anschluss mit Druckreduzierung und Absicherung auszuführen. Grundsätzlich muss der Druck im Rücklauf des Fernleitungsnetzes immer tiefer liegen als der zulässige Druck in der Hausanlage. Die maximale Vorlauftemperatur im Fernleitungsnetz wird durch die zulässige maximale Vorlauftemperatur der Hausanlage bestimmt.

Beim **indirekten Anschluss** durchströmt der primäre Wärmeträger nicht die Hausanlage, sondern wird durch einen Wärmeübertrager vom sekundären Wärmeträger hydraulisch getrennt. Die Primärseite ist für die maximalen Temperaturen und Drücke des Fernwärmenetzes, die Sekundärseite für die hauseigenen Drücke und Temperaturen auszulegen und abzusichern.

8.9.2 Anforderungen an die Wärmeübergabe

Die Anforderungen an die Ausführung des Wärmeanschlusses werden in den zum Wärmeliefervertrag gehörenden **Technischen Anschlussvorschriften (TAV)**, oder auch **Technische Anschlussbedingungen (TAB)** genannt, festgehalten. Diese dienen als Vorgaben zur Sicherstellung der technischen Anforderungen bei Planung, Umsetzung und Betrieb der Wärmeversorgung. Das Ziel der TAV ist es, einen minimalen technischen Standard zu erreichen, die Qualität der Wärmeversorgung zu gewährleisten und grobe Fehler sowie Mängel zu verhindern. Darin wird auch festgehalten, ob der Anschluss an das Fernwärmenetz grundsätzlich mit einem direkten oder indirekten Hausanschluss zu erfolgen hat.

Die TAV sollten kurz, prägnant und übersichtlich ausgeführt werden. Auf Normen und Vorschriften, welche grundsätzlich eingehalten werden müssen, ist zu verzichten. Die TAV sollten zudem realistische Vorgaben in Bezug auf Rücklauftemperatur, Grädigkeit, Druckverluste, Materialien und Weiteres machen und nur wo notwendig Produkte vorgeben (z. B. Wärmezähler, Ventile, Regelung usw.). In den TAV sollten der Sekundärseite klare Vorgaben gemacht werden, wie beispielsweise in Bezug auf die Warmwassererwärmung oder nicht erlaubte hydraulische Einrichtungen. Der Aufbau der TAV kann wie folgt gestaltet sein:

- Allgemeiner Teil
- Technische Grundlagen
- Ausrüstungsvorgaben
- Einbindung Sekundärseite
- Betriebliche Vorgaben
- Beilagen.

Weitere Hinweise und detaillierte Angaben zu den oben aufgeführten Inhalten der TAV sind im Leitfaden zur Planung von Fernwärme-Übergabestationen [76] und im AGFW-Merkblatt FW 515 – Technische Anschlussbedingungen – Heizwasser [79] zu finden.

Als **Minimalanforderung** sollte eine Fernwärme-Übergabestation bedienungs-, service- und wartungsfreundlich aufgebaut und gemäss den Technischen Anschluss-

vorschriften des Wärmeversorgungsunternehmens ausgeführt sein sowie den einschlägigen Normen und Richtlinien entsprechen. Im Leitfaden zur Planung von Fernwärme-Übergabestationen [76] wurden für eine Fernwärme-Übergabestation die folgenden Komponenten als minimale Ausrüstung definiert (siehe Bild 8.2):

1. Absperrarmaturen im Vor- und Rücklauf
2. Sichtanzeige Temperatur (Thermometer) im Vor- und Rücklauf
3. Sichtanzeige Druck (Manometer) im Vor- und Rücklauf
4. Entlüftung im Vorlauf (oben) und Entleerung im Rücklauf (unten)
5. Schmutzfänger im Vorlauf vor dem Wärmeübertrager (primärseitig) sowie Schmutzfänger im Rücklauf vor dem Eintritt Wärmeübertrager (sekundärseitig)
6. Wärmeübertrager
7. Kombiventil inklusive Antrieb
8. Wärmezähler (Volumenmessteil, Temperaturmessung, Rechenwerk, Temperaturfühler im Vor- und Rücklauf)
9. Sicherheitsventil, federbelastet
10. Expansions- oder Ausdehnungsgefäss
11. Regelgerät für Vorlauftemperatur Sekundärseite
    - Temperaturfühler im Vorlauf sekundärseitig
    - Temperaturfühler im Rücklauf primärseitig
    - Temperaturfühler für Aussentemperatur (wenn witterungsgeführt)
    - Verbindung zum Kombiventil
12. Aussentemperaturfühler.

Im Leitfaden zur Planung von Fernwärme-Übergabestationen [76] werden grundsätzliche Empfehlungen zur Auslegung der wichtigsten Komponenten abgegeben, Anforderungen an das Wärmeabgabesystem und an die Warmwassererwärmung in der Anschlussliegenschaft (Sekundärseite) gestellt sowie der Ablauf in der Planung und im Betrieb der Anlage beschrieben.

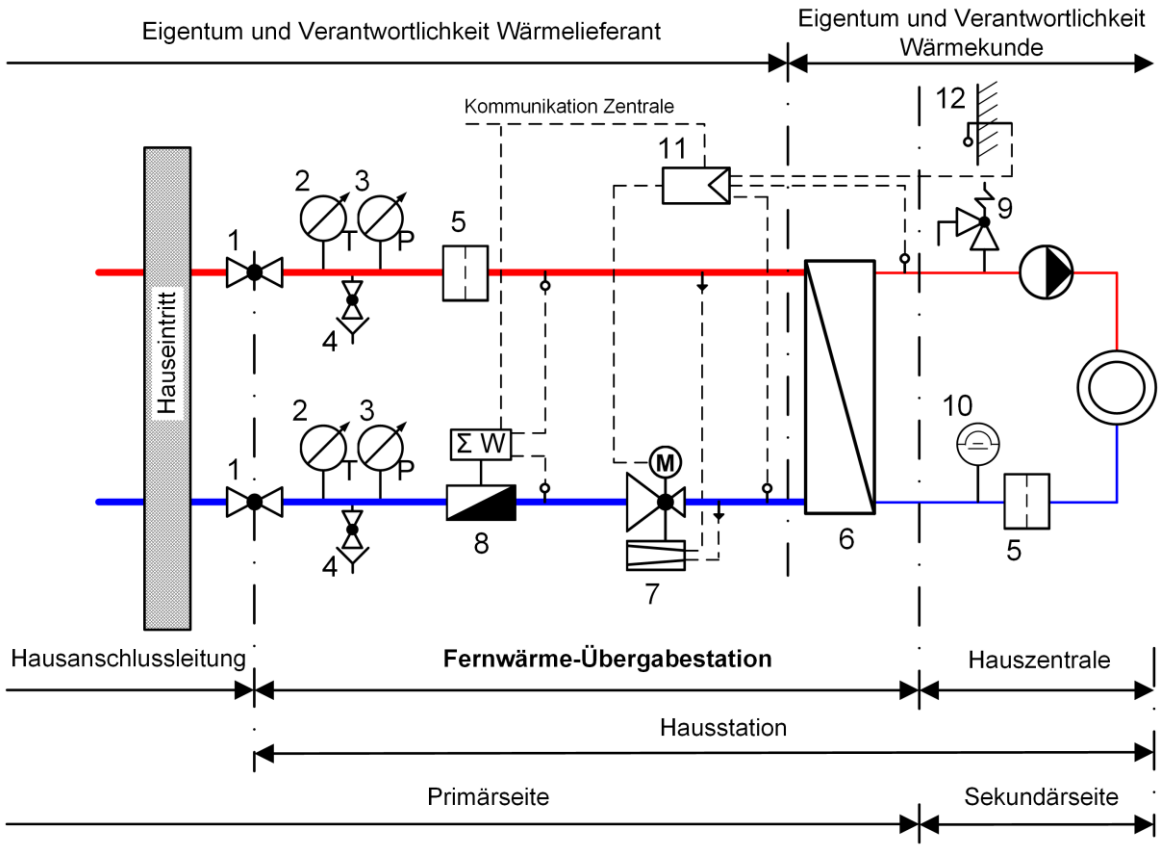


Bild 8.2 Minimalanforderung Fernwärme-Übergabestation [76].

9 Asche

9.1 Ascheanfall

Bei der energetischen Nutzung von Holzbrennstoffen fallen Holzaschen in unterschiedlichen Mengen und Qualitäten an. Diese müssen zum Schutz von Gewässern und Böden umweltgerecht entsorgt oder verwertet werden. Mengenmässig liegen die bei der Holzverbrennung anfallenden Holzaschen in der Grössenordnung von 0.5 bis 8 Gewichtsprozent des Holzinputs. Den tiefsten prozentualen Ascheanteil haben Pellets. Die beste Pelletqualität (ENplus A1) hat maximal 0.7 Gewichtsprozent Asche. Bei der Verwendung von Holzbrennstoffen mit hohem Rinden- und Nadelanteil und vielen Verunreinigungen sowie bei der Nutzung von Altholz kann der Ascheanfall bis zu 8 Gewichtsprozent ausmachen. Als Richtwert kann davon ausgegangen werden, dass der jährliche Ascheanfall pro MW Kesselnennleistung beim Einsatz von Hackgut mit Rinde etwa 10 t/a bis 20 t/a, beim Einsatz von Hackgut ohne Rinde etwa 8 t/a bis 15 t/a beträgt [80]. Tabelle 9.1 zeigt den jährlichen Ascheanfall aus Holzfeuerungen in Österreich, Deutschland und der Schweiz. Durch die vermehrte Holzenergienutzung werden diese Mengen in Zukunft zunehmen.

Tabelle 9.1 Ascheanfall in Tonnen Trockensubstanz pro Jahr [t TS/a] aus Holzfeuerungen in Österreich (2017), Deutschland (2015) und der Schweiz (2018); Quellen ([81], [82], [83]).

Land und Herkunft der Aschen	Ascheanfall t TS/a
Österreich total	254'000
Deutschland total	> 1'000'000
Schweiz total	72'000
davon: Anlagen < 50 kW	18'000
Rostaschen Anlagen > 50 kW	41'000
Zyklonflugaschen Anlagen > 50 kW	9'000
Filteraschen Anlagen > 50 kW	4'000

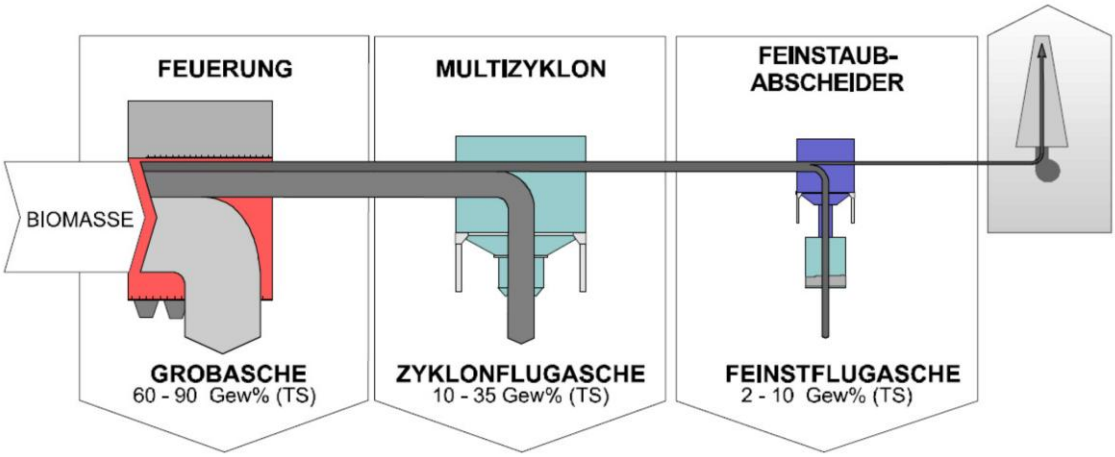


Bild 9.1 Anteile der verschiedenen Aschefraktionen in Gewichtsprozenten (Trockensubstanz TS) [81].

9.2 Aschefraktionen

Orte des Ascheanfalls

Bei grösseren automatischen Holzfeuerungen unterscheidet man aufgrund des Orts des Ascheanfalls und der Partikelgrösse zwischen folgenden Fraktionen (siehe Bild 9.1):

- Grobasche (Rostasche, Kesselasche, Bettasche)
- Zyklonflugasche (Zyklonasche, Flugasche, Kesselflugasche)
- Feinstflugasche (Filterasche).

Rostasche

Der Anteil Grobasche (bei Wirbelschichtfeuerungen spricht man von Bettasche) liegt zwischen 60 und 90 Gewichtsprozent der gesamthaft anfallenden Aschemenge. Grobasche fällt im Verbrennungsteil der Feuerungsanlage an und stellt einen überwiegend mineralischen Rückstand des eingesetzten Holzes dar. Diese Aschefraktion ist je nach Brennstoffart und Grad der Verunreinigungen oft mit Fremdmaterial wie Sand, Erde und Steinen durchsetzt, welche den Anteil an Grobasche erhöhen. Bei Alt- und Restholz ist ein nennenswerter Grobaschenanteil vor allem auf Verunreinigungen in Form von Nägeln, Scharnieren, Zementresten etc. zurückzuführen. Diese nichtbrennbaren Teile werden ebenfalls vorwiegend als Rostasche abgeschieden. Demgegenüber werden flüchtige Komponenten wie Schwermetalle und Salze vermehrt in die Gasphase transferiert und fallen deshalb in der Zyklon- und Feinstflugasche in erhöhten Konzentrationen an. Einen grossen Einfluss auf den Anteil an Grobasche hat auch die Ausbrandqualität. Ein Indikator dafür ist der TOC-Gehalt («Total Organic Carbon») der Asche. Ein hoher TOC-Gehalt bedeutet viel unverbranntes Material und verunmöglicht gewisse Ver-

wertungspfade (z. B. Zementindustrie) oder die Ablagerung auf Deponien. Für Letztere gelten länderspezifische TOC-Grenzwerte. Zur Grobasche gehören auch diejenigen Aschen und Ablagerungen, welche bei der periodischen Reinigung der Feuerungsanlage im Feuerraum und im Kessel anfallen.

Verunreinigungen im Brennstoff (Altholz) bewirken eine Senkung der Temperatur des Ascheschmelzpunktes. Dies führt ebenso zu Verschlackung und Anbackungen am Rost und an den Wänden wie zu hohe Feuerraumtemperaturen. Beim Erkalten werden die Anbackungen glasähnlich und sind nur schwer zu entfernen.

Zyklonflugasche

Zwischen 10 und 35 Gewichtsprozent der Asche fallen als Zyklonflugasche an. Diese besteht aus festen, überwiegend anorganischen Brennstoffbestandteilen, die in den Abgasen mitgeführt werden und in den Zyklonabscheidern (Multizyklonabscheider, Fliehkraftabscheider) nach dem Kessel anfallen. Die Partikelgrösse von Zyklonflugasche ist gross genug, damit sie sich noch mit Schwer- bzw. Fliehkraft abscheiden lässt (siehe Kapitel 5.8).

Feinstflugasche

Feinstflugasche hat einen Anteil von 2 bis 10 Gewichtsprozent und weist derart geringe Partikelgrössen auf, dass sie sich wie ein Fluid verhält und mit dem Abgasstrom mitgerissen wird. Sie lässt sich deshalb nur mit mechanischen oder elektrostatischen Partikelabscheidern (Elektro-, Gewebefilter) oder Wäschern abscheiden, welche dem Kessel und dem Zyklonabscheider nachgeschaltet sind. Bei Wäschern (Abgaskondensation) fällt die Filterasche als Kondensationsschlamm an.

9.3 Aschezusammensetzung

Die Zusammensetzung der Aschen ist abhängig von der Art der verwendeten Brennstoffe, der Ausbrandqualität und dem Ort ihres Anfalls. Asche aus naturbelassenem Holz besteht hauptsächlich aus Mineralstoffen, Alkalimetallen und Salzen. Als Nährstoffe sind Phosphor und Kalium in relevanten Mengen enthalten (siehe Tabelle 9.2). Daneben finden sich zahlreiche weitere wertgebende Inhaltsstoffe wie Calcium und Magnesium sowie Spurenelemente wie Mangan und Schwefel.

Tabelle 9.2 Anteile der relevanten Nährstoffe in verschiedenen Aschefraktionen aus der Verbrennung von naturbelassenem Holz in Gewichtsprozent der Trockenmasse [84].

Nährstoffe	Rostasche [m.-%]	Zyklonasche [m.-%]	Filterasche [m.-%]
Calcium CaO	32 - 48	25 - 46	25 - 40
Magnesium MgO	5 - 7	3 - 5	3 - 4
Kalium K_2O	4 - 8	4 - 9	7 - 21
Phosphor P_2O_5	2 - 5	2 - 5	2 - 4
Natrium Na_2O	< 1	< 1	1 - 2

In der Asche sind aber auch Schadstoffe angereichert, wobei vor allem die Schwermetalle Arsen, Blei, Cadmium, Chrom (als Chrom-gesamt bzw. Chrom-III und als Chrom-VI), Kupfer, Nickel, Quecksilber und Zink von Bedeutung sind (siehe Tabelle 9.3). Diese finden sich in besonders hohen Konzentrationen in der Feinstflugasche und die Konzentrationen sind bei der Nutzung von Altholz am höchsten. Aber auch Rostasche aus der Verbrennung von naturbelassenem Holz enthält Schwermetalle. Diese wurden vom Baum während seines Lebens über die Wurzeln aufgenommen und finden sich in konzentrierter Form in der Asche. Beim Altholz stammen die Schwermetalle aus Beschlägen, Farben, Beschichtungen und Fremdstoffen im Brennstoff. Aschen aus Nasselektroabscheidern weisen deutlich höhere Schwermetallgehalte auf als solche aus Trockenelektroabscheidern.

Zu den speziell toxischen Schwermetallen gehört Chrom-VI. Dieses wird als Chrom-III vom Baum aus dem Boden aufgenommen und im thermischen Prozess bei der Verbrennung des Holzes zu Chrom-VI oxidiert. Diese Oxidation geschieht weitgehend unabhängig vom eingesetzten Holzsortiment und lässt sich durch feuerungstechnische Massnahmen praktisch nicht beeinflussen. Im Gegensatz zu Chrom-III ist Chrom-VI gut wasserlöslich, stark toxisch, mutagen und kanzerogen. Aus diesem Grund ist bei der Handhabung von Holzaschen auf die Vermeidung von Staubbildung und eine angepasste persönliche Schutzausrüstung zu achten.

Chrom-VI spielt bei Grobaschen aus Anlagen, welche über ein System der Nassentaschung verfügen, nur eine untergeordnete Rolle, da hier das Chrom überwiegend als Chrom-III vorliegt.



Bild 9.2 Staubfreier Einbau der Holzaschen auf der Deponie (Quelle: Amstutz Holzenergie AG/Holzenergie Schweiz).

Unter gewissen Bedingungen wird durch die Alterung der Asche unter Wasserzugabe das Chrom-VI wieder zu Chrom-III. Dieser Prozess benötigt jedoch Raum und Zeit und lässt sich durch die Zugabe von Reduktionsmitteln wie Eisen-II-Sulfat beschleunigen.

Tabelle 9.3 Typische Gehalte an Schwermetallen in mg/kg TS von Asche aus der Verbrennung verschiedener Holzbrennstoffe und unterschiedlicher Aschefraktionen. Bei den Feinstflugaschen wurden nur Aschen von Trockenelektroabscheidern berücksichtigt ([84], [85], [86]).

Schwermetall	Naturbelassenes Holz			Restholz			Altholz		
	Grobasche	Zyklonflugasche	Feinstflugasche	Grobasche	Zyklonflugasche	Feinstflugasche	Grobasche	Zyklonflugasche	Feinstflugasche
Antimon Sb	< 10	< 10	< 10	10 - 31	< 30	k. A.	10 - 790	k. A.	50 - 810
Arsen As	< 1	k. A.	< 15	k. A.	k. A.	59 - 140	13 - 41	< 60	20 - 290
Blei Pb	2 - 45	10 - 70	33 - 266	6 - 350	180 - 1'182	k. A.	10 - 2'144	< 8'500	< 50'000
Cadmium Cd	1 - 6	21 - 36	3 - 81	3 - 30	16 - 30	k. A.	10 - 100	< 70	5 - 590
Chrom Cr gesamt	12 - 325	127 - 189	101 - 332	72 - 747	78 - 212	k. A.	109 - 873	< 1'415	< 404
Chrom Cr-VI	3 - 14	k. A.	4 - 47	7 - 13	k. A.	42 - 66	3 - 66	k. A.	3 - 62
Kupfer Cu	100 - 996	120 - 350	84 - 630	< 372	< 288	< 820	170 - 2'800	k. A.	< 422
Nickel Ni	42 - 80	10 - 79	28 - 99	∅ 113	∅ 61	k. A.	23 - 412	∅ 167	∅ 74
Quecksilber Hg	< 0.05	< 0.1	< 3.5	< 0.5	< 0.7	k. A.	< 0.5	k. A.	< 1.0
Zink Zn	22 - 738	1'271 - 2'469	22 - 25'177	∅ 503	∅ 3'656	k. A.	1'234 - 22'000	∅ 15'667	∅ 164'000

Die unterschiedliche Zusammensetzung der verschiedenen Aschefraktionen beeinflusst einerseits ihre Verwertungsmöglichkeiten, anderseits aber auch die Art und die Kosten ihrer Entsorgung. Dabei gelten in den verschiedenen Ländern unterschiedliche Rahmenbedingungen. «Die Abfälle von heute sind die Rohstoffe von morgen»! Im Hinblick auf die zukünftige Verwertung empfiehlt es sich deshalb, bei neuen, grösseren Anlagen eine getrennte Sammlung der drei Aschefraktionen einzubauen beziehungsweise Vorkehrungen für eine spätere Aschetrennung vorzusehen (siehe Kapitel 6.8).

Die aktuellen und zukünftigen Verwertungsmöglichkeiten hängen aber ebenfalls stark von der Qualität der Asche ab. Diese lässt sich im Anlagenbetrieb wie folgt positiv beeinflussen [87]:

- Verwendung des richtigen, der Feuerung angepassten Brennstoffs
- Vermeidung von Verunreinigungen im Brennstoff
- Parameter der Feuerung richtig einstellen (zu viel Primärluft führt zu Schlackenbildung, zu wenig Primärluft erhöht den unverbrannten Brennstoffanteil)
- Senkung der Rosttemperatur (Wasserkühlung, Primärabgasrückführung)
- Kontinuierlicher Betrieb ohne schnelle Lastwechsel
- Richtige Lagerung in der Heizzentrale.

9.4 Entsorgung und Verwertung

Holzasche lässt sich grundsätzlich entsorgen oder verwerten. Für die Entsorgung stehen grundsätzlich folgende Möglichkeiten zur Verfügung ([81], [82], [88]):

- Ablagerung auf einer Deponie
- Füllstoff im Bergversatz (kann wegen der Stabilisierung auch als eine Form der Verwertung gesehen werden).

Für die Verwertung stehen folgende Möglichkeiten zur Verfügung:

- Industrielle Nutzung (z. B. als Zuschlag- oder Rohstoff) für Zement und Beton
- Verwertung im Wege- und Strassenbau
- Nutzung als landwirtschaftlicher Dünger

- Beimischung zu Kompensationskalkungen im Wald
- Rückgewinnung von wertvollen Inhaltsstoffen.

Voraussetzung für eine **industrielle Nutzung** in der Zementindustrie sind ausreichende Mengen, welche in gleichbleibender, hoher Qualität anfallen. Deshalb kommen dafür nur sehr grosse Feuerungsanlagen in Frage. Wichtig ist, dass die Aschefraktionen trocken und getrennt gesammelt werden. Fremdteile, Verunreinigungen und ein hoher Anteil an unverbranntem Material verunmöglichen eine Verwendung in der Zementindustrie. Weniger anspruchsvoll ist in dieser Beziehung die Verwertung in der Produktion von gewissen Betonsortimenten («Magerbeton»).

Holzasche kann grundsätzlich als Kofferungsmaterial im **Wege- und Strassenbau** eingesetzt werden, soweit die Standorte ausserhalb von Wasserschutzgebieten und hydrogeologisch sensitiven Zonen sowie ausserhalb von Überschwemmungsgebieten liegen. Die Asche wird unterhalb einer wasserundurchlässigen Deckschicht aus Asphalt oder Beton eingebaut und dient als ungebundene Tragschicht (Frostschutzschicht oder Schottertragschicht), als gebundene Tragschicht (hydraulisch oder bituminös) oder als Strassendamm (Unterbau). Beim Einbau und beim Handling ist aus Gründen der Arbeitshygiene besonders auf die Vermeidung von Staubbildung zu achten.

Dank ihres Gehalts an Pflanzennährstoffen (siehe Tabelle 9.2) und der daraus resultierenden düngewirksamen Eigenschaften eignet sich Holzasche ausgezeichnet als **landwirtschaftlicher Dünger**. In Frage kommt dafür wegen der Schwermetalle ausschliesslich Grobasche aus der Verbrennung von naturbelassenem Holz. In Verbindung mit organischen Komponenten (Kompost, Gärprodukte) können organisch-mineralische Düngemittel hergestellt werden, die auch im Ökolandbau einsetzbar sind. In Zeiten des Klimawandels kommt dem Kalium (K_2O) als «Trockenresistenzelement» und dem Kalk (CaO) als Grundvoraussetzung für die Aufnahme und Speicherung von Wasser eine besondere Bedeutung zu. Bedingung für die Verwertung als landwirtschaftlicher Dünger ist eine strenge Gütesicherung wie zum Beispiel das RAL-Gütezeichen in Deutschland. Der Einsatz als landwirtschaftlicher Dünger unterliegt länderspezifischen Regelungen, welche teilweise deutlich voneinander abweichen (siehe Kapitel 19).

Zumindest in Baden-Württemberg ist der Einsatz von Holzasche als **Beimischung zu Kompensationskalkungen im Wald** mittlerweile etabliert. Der maximale Ascheanteil am Gemisch darf 30 % nicht überschreiten, 70 % sind Dolomitkalk. Innerhalb von 15 Jahren dürfen maximal 2.5 Tonnen Asche pro ha ausgebracht werden. Zugelassen sind auch hier nur gütegesicherte Rostaschen aus der Verbrennung von naturbelassenem Holz.

Analog der Schlacke aus Kehrichtverwertungsanlagen wird auch die Holzasche in Zukunft für die **Rückgewinnung von wertvollen Inhaltsstoffen** Verwendung finden. In verschiedenen Ländern laufen diesbezüglich Projekte (z. B. Rückgewinnung von Zink aus Feinstflugaschen von Altholzfeuerungen).

Die Verwertungs- und Entsorgungspfade der Holzasche hängen sehr stark von nationalen Gesetzen, Richtlinien und Regelwerken ab und sind mitunter komplex. Dementsprechend wird nachfolgend auf die Situation in ausgewählten Ländern eingegangen. Die erwähnten Vorschriften sind in gesammelter Form auch in Kapitel 19 zu finden.

9.4.1 Situation in der Schweiz

In der Schweiz steht zurzeit die Entsorgung im Vordergrund. Die entsprechende Abfallverordnung [89] sieht eine Deponierung der Holzasche gemäss Bild 9.3 vor:

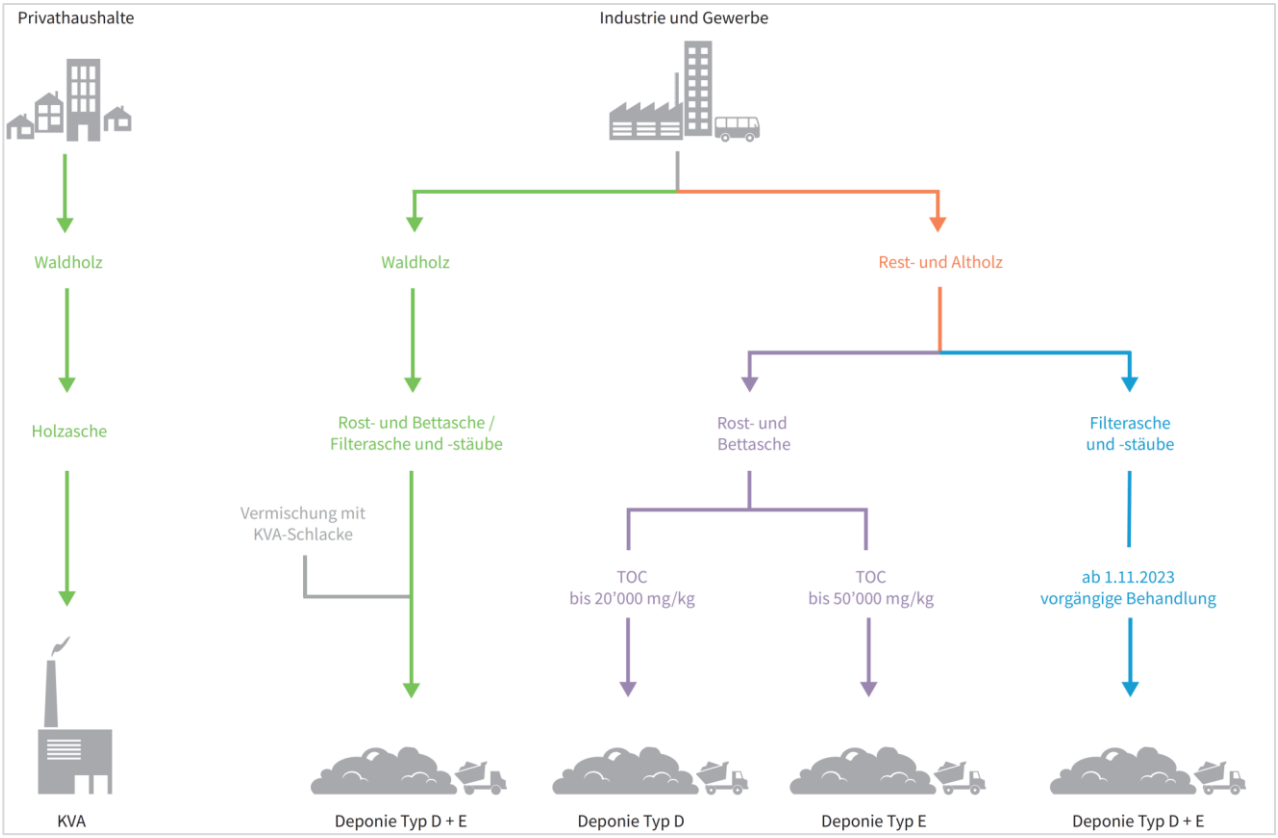


Bild 9.3 Entsorgungspfade in der Schweiz (KVA … Kehrichtverbrennungsanlage, TOC … gesamter organischer Kohlenstoff, Deponietypen entsprechend Schweizer Abfallverordnung) [89].

Holzaschen aus kleinen Anlagen sollen mit dem Kehricht in einer Kehrichtverbrennungsanlage entsorgt werden. Rost-, Zyklon- und Filteraschen aus der Verbrennung von Wald- und Restholz in grösseren Anlagen sind auf Deponien des Typs D und E abzulagern. Rostaschen aus der Verbrennung von Altholz sind ebenso auf diesen beiden Deponietypen D und E zu entsorgen. Da auf diesen beiden Deponien auch Schlacke aus der Kehrichtverbrennung entsorgt wird, welche grosse Mengen an freiem Eisen enthält, wird auf diesen Deponien das Chrom-VI bei guter Durchmischung rasch wieder zu Chrom-III reduziert. Auf der Deponie Typ D müssen die Aschen einen TOC-Grenzwert von maximal 20'000 mg/kg einhalten, auf der Deponie Typ E liegt der TOC-Grenzwert bei 50'000 mg/kg. Gemäss der Abfallverordnung (VVEA) darf Filterasche aus der Verbrennung von Altholz ab dem 1. Januar 2034 nicht mehr auf Deponien des Typs D oder E abgelagert werden (Art. 52a VVEA), sondern muss einer geeigneten Vorbehandlung unterzogen werden oder die Grenzwerte gemäss Anhang 5 VVEA einhalten.

Im Detail wird dieser Vollzug in der zukünftigen Vollzugshilfe «Verbrennungsrückstände, Teil II, Holzaschen» des Bundesamts für Umwelt (BAFU) geregelt. Dort wird auch definiert, ab welcher Leistungsgrenze eine Entsorgung auf der Deponie erforderlich ist.

Die Verwertung als land- und forstwirtschaftlicher Dünger ist aufgrund der aktuellen Vorschriften nicht möglich. Die industrielle Verwertung findet erst ansatzweise statt. Ein Grund dafür ist die verhältnismässig kleine durchschnittliche Leistung des schweizerischen Anlagenparks. Deshalb sind zurzeit vor allem Anstrengungen zum Aufbau regionaler Poolingsysteme im Gange.

9.4.2 Situation in Deutschland

In Deutschland begann die Bundesgütegemeinschaft Holzasche e.V. etwa 2010 mit dem Aufbau eines Qualitätssicherungssystems für Grobaschen aus naturbelassenen Holzbrennstoffen (Abfallschlüsselnummer 100101 gemäss Abfallverzeichnis-Verordnung [90]). Das Ziel besteht darin, Holzaschen zu qualifizieren, die bestimmte Mindestgehalte an wertgebenden Pflanzennährstoffen wie Phosphor, Kalium und Magnesium sowie basisch wirksamen Stoffen aufweisen und gleichzeitig die Schadstoffgrenzwerte, insbesondere bei den Schwermetallen, einhalten.

Grundlage des Qualitätssicherungssystems bildet das sogenannte Qualitätsmanagement-Handbuch (QMH) für Holzasche als Ausgangsstoff für Dünger und als Dünger. Qualifizierte Holzaschen erhalten nach erfolgreichem Anerkennungsverfahren das RAL-Gütezeichen «Dünger» (RAL-GZ 252) und verbleiben dann dauerhaft im Überwachungsverfahren (siehe www.holzaschen.de).

Die Zeichenvergabe erfolgt durch die Bundesgütegemeinschaft Holzasche e.V. als eigenständige Institution unter dem Dach der Bundesgütegemeinschaft Kompost (BGK). Neben Aschen aus naturbelassenem Holz können auch geeignete Aschefraktionen aus weiteren Biomassebrennstoffen wie z. B. Stroh das RAL-GZ 252 erlangen (www.kompost.de).

Die Gütesicherung von Holzaschen bezweckt die Umsetzung von Kreislaufwirtschaftskonzepten im Rahmen der einschlägigen Vorschriften des Abfallrechts (KrWG [91], BioAbfV [92], DepV [93]) und des Düngerechts (DüMV [94], DüngG [95], DüV [96]). Qualitätsgesicherte Holzaschen ersetzen Mineraldünger in der konventionellen und ökologischen Landwirtschaft, ermöglichen Erhaltungskalkungen im Forst und tragen so zu einer nachhaltigen und ressourcenschonenden Bioökonomie bei. Aus entsorgungspflichtigem Abfall wird dadurch ein werthaltiges Produkt. Dabei spielen betriebswirtschaftliche Aspekte eine entscheidende Rolle. Dem zusätzlichen personellen und finanziellen Aufwand bei der Gütesicherung stehen Erlöse für die erzeugten Düngemittel und Einsparungen bei den bisherigen Entsorgungswegen, z. B. der Ablagerung auf Deponien, entgegen. Prädestiniert für die Annahme, Aufbereitung und Veredelung von Holzaschen sind Kalkwerke (mineralischer Dünger) und Kompostieranlagen (organisch-mineralische Düngemittel), die über eine Genehmigung nach Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) verfügen.

Die fachgerechte Deponierung ist in Deutschland nach wie vor der häufigste Entsorgungspfad für Grobaschen aus Anlagen mit naturbelassenem Holz (AVV 100101 gemäss Abfallverzeichnis-Verordnung [90]). Es handelt sich in der Regel um Deponien der Klasse DK II nach DepV für belastete, jedoch nicht gefährliche mineralische Abfälle, deren Betreiber zertifizierte Entsorgungsfachbetriebe sind. Vor der Überlassung der Aschen an ein autorisiertes Transportunternehmen oder bei Direktanlieferung auf die Deponie ist immer eine Deklarationsanalyse des Abfallerzeugers vorzulegen. Diese erstellt ein Fachlabor auf Basis einer Materialprobe, die durch fachgerechte Probenahme vor Ort durchgeführt wird. Die zu bestimmenden Parameter wie Schwermetalle, gelöste Feststoffe und Glühverlust (max. 5 %) regelt die Deponieverordnung.

Filterstäube aus Anlagen mit unbehandeltem Holz (AVV 100103 gemäss Abfallverzeichnis-Verordnung [90]) sind, wenn es sich um Zyklonflugaschen handelt, je nach Analyseergebnis des Materials und der jeweiligen Genehmigung der Deponie im Einzelfall auf Obertage-Deponien ablagerungsfähig. Für gefährliche Abfallfraktionen, die in der AVV mit * gekennzeichnet sind (z. B. AVV 100118 Abfälle aus der Abgasbehandlung, die gefährliche Stoffe enthalten gemäss Abfallverzeichnis-Verordnung [90]), trifft dies nicht zu. Derartige Feinstflugaschen aus Elektroabscheidern oder Gewebefiltern enthalten deutlich mehr Schadstoffe und sind nur in Untertagedeponien (DK IV), z. B. im Bergversatz, ablagerungsfähig. Standorte von oberirdischen Sonderabfalldeponien DK III sind in Deutschland äusserst selten. In Bayern gibt es derzeit eine einzige Anlage im Raum Augsburg. Abfallerzeuger und Beförderer von gefährlichen Abfällen sind zwingend zur Nachweisführung nach der Nachweisverordnung (NachwV [97]) verpflichtet.

Die Verwendung von Aschen aus Biomassefeuerungsanlagen in der Zement- und Baustoffindustrie («Holzaschebeton») wird derzeit unter anderem an der Universität Stuttgart erprobt. Wichtige Fragen sind die Dauerhaftigkeit und Festigkeit der Betone, immer in Anlehnung an die einschlägigen DIN-Normen und Konformitätskriterien.

9.4.3 Situation in Österreich

In Österreich gelten Holzaschen (Pflanzenaschen) grundsätzlich als Abfall. Für die Deponierung massgebend sind die Bestimmungen der Deponieverordnung 2008. Rostasche und Zyklonflugasche (nach Absenkung des pH-Wertes) können bei Schwermetallgehalten unterhalb der gesetzlichen Grenzwerte auf Deponien für nicht gefährliche Abfälle (Reststoff- oder Massenabfalldeponie) abgelagert werden [98]. Werden die Schwermetall-Grenzwerte überschritten, ist die Ablagerung nur auf Deponien für gefährliche Abfälle (Untertagedeponie) zulässig. Derzeit wird ein grosser Teil der in Österreich anfallenden Holzaschemengen deponiert. Soweit entsprechende Möglichkeiten vorhanden sind, wird die Holzasche von Entsorgungsunternehmen auch als Zuschlagstoff an die Zementindustrie abgegeben, wodurch sich die Entsorgungskosten reduzieren lassen.

Die Verwertung von Holzaschen als Dünger auf land- oder forstwirtschaftlichen Nutzflächen ist unter bestimmten Voraussetzungen möglich. Die Holzascheverwertung ist derzeit jedoch in Österreich nicht explizit durch gesetzliche Vorschriften geregelt. Deshalb sind mehrere Gesetze und Verordnungen zu beachten:

- Abfallwirtschaftsgesetz 2002
- Abfallverzeichnisverordnung 2003 (Schlüsselbezeichnungen für Aufzeichnungspflichtige)
- Abfallbilanzverordnung (Aufzeichnungspflicht)
- Altlastensanierungsgesetz
- Kompostverordnung
- Düngemittelgesetz
- Forstgesetz (Ausbringung im Wald)
- Wasserrechtsgesetz
- Düngeverbote im Rahmen der Naturschutzgesetze der Bundesländer
- Bodenschutzgesetze einiger Bundesländer

Welche dieser Gesetze und Verordnungen im Einzelfall zu beachten sind, beziehungsweise ob eventuell weitere oben nicht genannte Vorschriften gültig sind, ist im Einzelfall zu überprüfen. Im Folgenden sind einige allgemeingültige Hinweise zur Ascheverwertung dargestellt [80].

Für die Verwertung als Dünger eignen sich grundsätzlich Grobasche und Zyklonflugasche, sofern entsprechende Grenzwerte bezüglich der Aschezusammensetzung eingehalten werden. Gemische aus diesen Aschefraktionen sind zur Verwertung nur zugelassen, wenn diese bereits als Gemisch anfallen und die Zusammensetzung des Gemischs die Grenzwerte einhält. Nicht geeignet sind aufgrund ihrer hohen Schwermetallgehalte in der Regel Filteraschen (Feinstflugasche).

Asche-Beprobungen sind in regelmässigen Intervallen je nach Kesselnennleistung und beabsichtigter Verwendung (land-/forstwirtschaftlich) alle 10 Jahre bis hin zu dreimal pro Jahr vorgeschrieben. Auf Basis der Ascheanalyse werden die Holzaschen in Güteklassen eingeteilt. Je nach erreichter Güteklasse kann die Holzasche ohne weitere Untersuchungen (Güteklasse A) oder nur mit zusätzlichen Bodenuntersuchungen auf land- und forstwirtschaftlich genutzten Flächen ausgebracht werden. Aufgrund der Abfallbilanzverordnung besteht eine Aufzeichnungspflicht über Menge, Herkunft und Verbleib der Asche in Form einer jährlichen elektronischen Meldung. In der Landwirtschaft als Dünger eingesetzte Holzasche muss im landwirtschaftlichen Düngemanagement berücksichtigt werden. Bei der Ausbringung sind vorgeschriebene Mindestabstände zu Gewässern einzuhalten.

Für weiterführende Informationen werden [80] im Überblick und vertiefend [99] (inkl. Ablaufdiagrammen zur praktischen Durchführung hinsichtlich erforderlicher Anträge, Aufzeichnungen usw.) empfohlen.

10 Wirtschaftlichkeit

10.1 Wirtschaftlichkeitsfragen bei Holzheizwerken

Bei der Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Holzheizwerken ergeben sich verschiedene Fragestellungen. Die wichtigsten sind:

- Wie hoch werden die Wärmegestehungskosten sein?
- Wie ist die Wirtschaftlichkeit des Holzheizwerkes im Vergleich zu anderen Energiesystemen?
- Welche Wärmepreise können den zukünftigen Wärmekundinnen und -kunden angeboten werden?
- Welche Tarifstruktur soll gewählt werden (Anschlussgebühr/Grundpreis/Messpreis/Arbeitspreis)?
- Welches sind die wesentlichsten wirtschaftlichen Risiken?
- Wie ist die wirtschaftliche Entwicklung über die Betriebszeit der Anlage und sich ändernden Rahmenbedingungen (z. B. Brennstoffpreise, sinkender Wärmeabsatz durch thermische Sanierung und Klimawandel, CO_2-Bepreisung, politisches und gesellschaftliches Umfeld) zu beurteilen?

Die Wahl der geeigneten Methode für die Wirtschaftlichkeitsbeurteilung hängt von der Fragestellung und dem Projektstand ab. In den frühen Projektphasen (Machbarkeitsstudie) ist eine Abschätzung der Investitions- und Wärmegestehungskosten aufgrund von Erfahrungs- und Richtwerten ausreichend (siehe auch Kapitel 3.2). Mit den Diagrammen in Kapitel 10.8 können im Rahmen einer Machbarkeitsstudie die Investitionskosten für die Wärmeerzeugung und Wärmeverteilung abgeschätzt werden. Später wird die Genauigkeit der Kostenpositionen durch konkrete Angebote erhöht sowie die Sensitivität und die wirtschaftliche Entwicklung des Projektes über die Projektlaufzeit betrachtet. In den nachfolgenden Kapiteln wird gezeigt, welche Methoden geeignet und welche Hilfsmittel anwendbar sind, um die obigen Fragen beantworten zu können. Zuerst soll aber geklärt werden, wie bei der Wirtschaftlichkeitsbeurteilung die Verantwortungen zwischen den Projektbeteiligten verteilt sind.

10.2 Verantwortlichkeiten

Die Hauptverantwortung für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit eines Holzheizwerks liegt bei der Bauherrschaft. In der Regel liefert die Planerin oder der Planer der Bauherrschaft zuverlässige Daten bezüglich:

- Leistungs- und Wärmebedarf der vorgesehenen Wärmekundinnen und -kunden
- Energieinhalt des vorgesehenen Brennstoffsortiments und Angaben über möglicherweise zu erwartende Folgekosten (besonders wichtig bei kostengünstigen Brennstoffsortimenten)
- Investitionskosten
- Wartungs- und Instandsetzungskosten
- Energiekosten, bestehend aus Brennstoffkosten und Hilfsenergiekosten (bedarfs- oder verbrauchsgebundene Kosten).

Bei der Durchführung der Wirtschaftlichkeitsrechnung muss die Planerin oder der Planer die Bauherrschaft beraten können. Als Zusatzauftrag kann die Planerin oder der Planer anstelle der Bauherrschaft auch die Berechnungen für die Wirtschaftlichkeit durchführen. In jedem Fall muss aber die Bauherrschaft entscheiden, welche Grundannahmen für die Wirtschaftlichkeitsrechnung gelten sollen. Hierzu gehören:

- Kalkulationszinssatz
- Nutzungsdauer der Gewerke
- Inflationsrate (Preissteigerungsrate)
- Betriebskostensteigerung
- Energiepreise: Bei Holzheizwerken umfasst dies auch die Wahl des Brennstoffsortiments und den sich daraus ergebenden Brennstoffpreis.
- Energiepreissteigerungen
- Entwicklung des Wärmebedarfes aufgrund der Sanierungsrate der Wärmebezügerinnen und -bezüger oder Ausbauten und Verdichtungen des Wärmenetzes.

Es empfiehlt sich, diese Grundannahmen schriftlich zu vereinbaren.

Sollen in einem geplanten Wärmenetz verschiedene Wärmekundinnen und -kunden mit Wärme versorgt werden, so sind die Verantwortlichkeiten zwischen Bauherrschaft und der Planerin oder dem Planer wie folgt aufzuteilen:

Bauherrschaft

- Hauptverantwortlich für die Wirtschaftlichkeitsrechnung. Muss diese und die Basisdaten dazu prüfen und kritisch hinterfragen.
- Entscheidung, welche potenziellen Abnehmenden zu berücksichtigen sind
- Entscheidung über den anzunehmenden Anschlusszeitpunkt (beeinflusst den Zeitpunkt der anfallenden Investitionskosten und der zu erwartenden Einnahmen aus dem Wärmeverkauf).

Planerin/Planer

- Verantwortlich für die zuverlässige Ermittlung des erforderlichen Wärmeleistungsbedarfs einschliesslich des Lastgangs und des zu erwartenden Jahreswärmebedarfs der potenziellen Kunden
- Verantwortlich für die Ermittlung der Investitionskosten für den Anschluss der potenziellen Wärmekundinnen und -kunden

10.3 Kostenstruktur von Holzheizwerken

Bei der Ermittlung der Kosten von gebäudetechnischen Anlagen werden laut VDI-Richtlinie 2067 [100] folgende vier Kostengruppen berücksichtigt:

- Kapitalgebundene Kosten (einschliesslich Instandsetzung und Erneuerung)
- Verbrauchsgebundene Kosten
- Betriebsgebundene Kosten
- Sonstige Kosten

Die Zuordnung der einzelnen Kostenarten zu diesen Kostengruppen für ein Holzheizwerk zeigt Tabelle 10.1.

Für einzelne Kostenarten werden bei der Wirtschaftlichkeitsrechnung die Kosten aufgrund von Richtwerten abgeschätzt, zum Beispiel als Prozentsatz der Investitionssumme oder der produzierten Wärmemenge. Dabei muss klar definiert sein, welche Kostenarten den einzelnen Kostengruppen zugeordnet sind. Gemäss VDI 2067 [100] bedeutet Instandhaltung die Durchführung von Massnahmen zur Bewahrung und Wiederherstellung des Sollzustands und umfasst die Kostenarten «Instandsetzung», «Wartung» und «Inspektion»:

- **Instandsetzung** (in der Schweiz meist «Unterhalt» genannt): Massnahmen zur Wiederherstellung des Sollzustands
- **Wartung**: Massnahmen zur Bewahrung des Sollzustands
- **Inspektion**: Massnahmen zur Feststellung und Beurteilung des Istzustands

Tabelle 10.1 Kostengruppen und Kostenarten eines Holzheizwerks. Grundlagen und Richtwerte für die Ermittlung der jährlichen Kosten. Dabei ist zu beachten, dass – abweichend von VDI 2067 [100] – die Kosten für die Wartung in den Personalkosten enthalten sind. Die Angaben in Klammern () beziehen sich auf das ÖKL-Merkblatt 67 [101].

Kostengruppe	Kostenart	Basis für die Ermittlung der jährlichen Kosten	Richtwerte
Kapitalgebundene Kosten	Kapitalkosten der Anlagenkomponenten und baulichen Anlagen (Investitionen)	Investitionssummen der Gewerke, Nutzungsdauer, Zins	Nutzungsdauer: siehe Tabelle 10.2 Zinsen: gemäss Vorgabe der Bauherrschaft oder der geldgebenden Institutionen (Förderung gemäss [101])
	Instandsetzungskosten (Reparaturen gemäss VDI 2067 [100])	Investitionssummen der Gewerke, Prozentsatz der Investitionssumme	Siehe Tabelle 10.2
Verbrauchsgebundene Kosten	Brennstoffkosten	Jahresverbrauch und Heizwert oder Brennstoffverbrauch, Brennstoffpreis	Effektive, auf Angeboten basierende Preise (zusätzlich Mindestpreis 23 € je MWh Rohenergie, bezogen auf den Heizwert H_u, gemäss [101])
	Hilfsenergie (Elektrizität) für Wärmeerzeugung und Wärmeverteilung	Prozentsatz der Wärmemenge (erzeugt bzw. verteilt) x Elektrizitätspreis	für Wärmeerzeugung: 1 - 1.5 % der erzeugten Wärmemenge für Wärmenetz: 0.5 - 1 % der verteilten Wärmemenge (min. 1.5 % bezogen auf erzeugte Wärmemenge; 2 % bei Anlagen mit Abgaskondensation oder Elektroabscheider gemäss [101])
	Betriebsstoffe Wärmeerzeugung (z. B. für SNCR-Anlagen)	Preis, Verbrauchsmenge	effektive Kosten abschätzen
	Ascheentsorgung	Brennstoffeinsatz, Aschegehalt, Entsorgungsart	effektive Kosten abschätzen (evtl. im Brennstoffpreis enthalten)
Betriebsgebundene Kosten	Personalkosten (für Bedienung, Reinigung, Wartung, Inspektion, ohne Verwaltung)	Prozentsatz der Investitionskosten Wärmeerzeugung	um 1.5 % der Investitionskosten Wärmeerzeugung (mindestens 2.5 - 5 € je erzeugter MWh Wärme gemäss [101])
	Mieten, Pacht, Konzessionsgebühren	einzelfallabhängig	effektive Kosten abschätzen
	Schornsteinfeger, Abgasuntersuchung, Emissionsmessung	einzelfallabhängig	effektive Kosten abschätzen
Sonstige Kosten	Versicherungen, Steuern, allgemeine Abgaben, Verwaltungskosten	Prozentsatz der Investitionssumme	0.5 - 1.5 % der Gesamtinvestition

Tabelle 10.1 gibt einen Überblick über die Kostenarten und zeigt, welche Basisdaten für die Berechnung verwendet werden sollen. Teilweise sind auch Richtwerte angegeben. Diese können sowohl für die Wirtschaftlichkeitsberechnung nach der Annuitätenmethode als auch für eine Planbilanz und eine Planerfolgsrechnung herangezogen werden. Die angegebenen Richtwerte dürfen von der Planerin oder dem Planer nicht ungeprüft übernommen werden. Da die spezifischen Kosten (z. B. angegeben als Kosten/MWh) teilweise von der Anlagegrösse und/oder der Vollbetriebsstundenzahl abhängig sind, ist für jeden Einzelfall zu prüfen, ob ein Richtwert verwendet werden kann und wie hoch dieser angesetzt werden soll. Für Österreich macht das ÖKL-Merkblatt 67 [101] einzelne Vorgaben. Dabei handelt es sich im Wesentlichen um Mindestvorgaben, die nicht unterschritten werden sollen.

Die anzunehmende Nutzungsdauer für die Wirtschaftlichkeitsrechnung ist gemeinsam mit der Bauherrschaft und eventuell mit möglichen geldgebenden Institutionen (Banken, Förderstellen usw.) festzulegen. Bei der Festlegung der Nutzungsdauer ist zu beachten, dass diese nicht zwingend von der technischen Lebensdauer abhängig ist. Die Nutzungsdauer wird auch von der Veränderung der Bedürfnisse und von Technologieentwicklungen beeinflusst. Zudem werden bei Sanierungen nicht einzelne Elemente, sondern in der Regel mehrere Bauteile gleichzeitig ersetzt – unabhängig davon, ob jedes Element die technische Lebensdauer erreicht hat.

Tabelle 10.2 Richtwerte für die Nutzungsdauer und die Instandsetzungskosten

Gewerk	Nutzungsdauer Jahre	Spez. Instandsetzungskosten %
Holzspezifische Anlagenteile*	20	3.0
Spitzenlastspezifische Anlagenteile*	20	2.0
Hydraulik	20	2.0
Elektro- und Haustechnikinstallationen	20	2.0
Bauliche Anlagen und Erschliessung	50	1.0
Hauptnetz (inkl. Rohrleitungen und Erdarbeiten)	40	1.0
Wärmeübergabestation	30	2.0
Fahrzeuge	15	3.0
Planung**	gemittelt	-

* inkl. Regelung und Steuerung

** die gemittelte Nutzungsdauer für die Planung muss mit den Planungskosten für die einzelnen Gewerke gewichtet respektive die Planungskosten den einzelnen Gewerken zugerechnet werden

Die VDI-Richtlinie 2067 [100] enthält detailliertere und teilweise abweichende Angaben zur Tabelle 10.2. Für Berechnungen nach VDI sind die Angaben aus der VDI-Richtlinie 2067 zu verwenden.

10.4 Wirtschaftlichkeitsrechnung

10.4.1 Einleitung

In der Wirtschaftlichkeitsrechnung werden die Wärmegestehungs- und Wärmeverteilungskosten, die Investitionskosten und die Kosten für Betrieb und Instandhaltung ermittelt. In einem Variantenvergleich können unterschiedliche Heizsysteme oder Ausführungsvarianten bezüglich ihrer Kosten gegenübergestellt werden. Die Wirtschaftlichkeitsrechnung ist aber auch die Grundlage für die Preisbildung und die Preisgestaltung des Wärmeverkaufs.

Für einen Variantenvergleich sollten ausser den Investitionskosten auch die Wärmegestehungskosten jeder Variante ermittelt werden. Der Vergleich der Wärmegestehungskosten erlaubt einen Vollkostenvergleich über die Nutzungsdauer der Anlage. Die Berechnung der Wärmegestehungskosten nach der Annuitätenmethode wird in der Praxis häufig angewendet und ist in Kapitel 10.4.2 beschrieben.

Um die wirtschaftliche Entwicklung eines Wärmeverbundes beurteilen zu können, sollten die Aufwendungen und Erträge über mehrere Jahre berechnet werden. Hierzu eignet sich die Barwertmethode (NPV-Methode) sehr gut, mit der der effektive (interne) Zinssatz (IRR) der Investition berechnet werden kann. Das Wirtschaftlichkeitstool von QM Holzheizwerke basiert auf der Methode des internen Zinssatzes (siehe Kapitel 10.7).

Für die Analyse von Energiesystemen, die in der Regel eine lange Nutzungsdauer aufweisen und bei denen die Preissteigerung und andere künftige Veränderungen der Eingangsdaten daher von Bedeutung sind, wird die Verwendung **dynamischer Rechenmethoden** empfohlen. Bei diesen Verfahren werden die im Betrachtungszeitraum erwarteten Veränderungen abgeschätzt oder anhand von statistischen Mittelwerten vorgegeben, um die Jahreskosten für die gesamte Nutzungsdauer der Anlage prognostizieren zu können. **Statische Rechenmethoden** betrachten demgegenüber nur die Verhältnisse, wie sie zum Zeitpunkt der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung vorliegen. Bei Betrachtungszeiträumen, die in der Regel mindestens 15 Jahre betragen, können sich damit deutliche Abweichungen zu dynamischen Verfahren ergeben. Vielfach kann bei dynamischen Verfahren von vereinfachten Annahmen ausgegangen werden, sodass für die Wirtschaftlichkeitsrechnung einfache Summenformeln verwendet werden können und der Rechenaufwand damit nicht wesentlich grösser ist als für statische Verfahren.

Die wichtigsten dynamischen Rechenmethoden sind

- Kapitalwertmethode
- Annuitätenmethode
- Barwertmethode.

10.4.2 Berechnung der Wärmegestehungskosten mit der Annuitätenmethode

Für die Berechnung der Wärmegestehungskosten wird üblicherweise die Annuitätenmethode angewandt. Diese ist in der VDI-Richtlinie 2067 [100] detailliert beschrieben. Die Annuitätenmethode ermittelt die im Betrachtungszeitraum anfallenden mittleren jährlichen Kosten. Die Jahreskosten setzen sich aus den Kapital-, Betriebs- und Energiekosten zusammen. In den Kapitalkosten (I • a) wird die Investition über die Nutzungsdauer (Laufzeit der Anlage) verzinst und getilgt. Die Betriebskosten setzen sich aus Instandhaltungs- und Personalkosten zusammen. Die Energiekosten ergeben sich aus dem zu erwartenden Energieverbrauch inklusive Hilfsenergie je Energieträger. Die jährlichen Betriebs- und Energiekosten A werden unter Berücksichtigung ihrer möglichen Entwicklung (d • a) zu den Kapitalkosten addiert.

Da die für die Wärmegestehungskosten relevanten Kostenpositionen stark von Land/Region, Standort, Rahmenbedingungen, Bauweise, Lohnstrukturen, Energiepreisen, Schnittstellen usw. abhängen, wird auf die Angabe von Richtwerten bewusst verzichtet. Ein Vergleich der Wärmegestehungskosten mit anderen Lösungen im Rahmen eines Variantenvergleiches ist oftmals zweckdienlicher.

Berechnung der **Jahreskosten K** nach [102]:

$$K = I * a + A * d * a$$

- K Jahreskosten [EUR/a; CHF/a]
- I Investitionskosten (je Gewerk) [EUR; CHF]
- A Jährliche Betriebskosten [EUR/a; CHF/a] best. aus:
  - Wartungs- und Instandsetzungskosten
  - Energiekosten (Brennstoffe und Hilfsenergie)
  - sonstige Kosten
- a Annuitätsfaktor [-], berechnet aus:

$$\text{für } i = 0 : a = \frac{1}{n} \qquad \text{für } i > 0 : a = \frac{i * (1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

- d Diskontierungssummenfaktor (auch Rentenbarwertfaktor oder Abzinsungssummenfaktor) [-], berechnet aus:

$$d = \frac{(1+i-e)^n - 1}{(1+i-e)^n * (i-e)}$$

  - i Kalkulationszinssatz [-]
  - n Betrachtungsdauer (Nutzungsdauer) [-]
  - e allgemeine Teuerung, Inflationsrate [-]

Die Bestimmung der Nutzungsdauer und der Instandsetzungskosten kann gemäss Tabelle 10.2 erfolgen. Die anzunehmende Nutzungsdauer kann aber auch von der Bauherrschaft, einer kreditgebenden Institution (Bank) oder einer möglichen Förderstelle vorgegeben werden.

In vielen Fällen sind gegenüber der in VDI 2067 detailliert beschriebenen Methode die nachfolgenden Vereinfachungen möglich:

- Die Investitionen fallen nur zu Beginn des Betrachtungszeitraumes an.
- Der Betrachtungszeitraum entspricht der Lebensdauer der Investitionen. Das heisst, dass innerhalb des Betrachtungszeitraumes keine Ersatzbeschaffungen getätigt werden müssen und keine Restwerte am Ende des Betrachtungszeitraumes mehr bestehen.

Entspricht die Nutzungsdauer nicht dem Betrachtungszeitraum, so muss dies wie folgt berücksichtigt werden:

- Ist die Nutzungsdauer kürzer als der Betrachtungszeitraum, so ist die Ersatzinvestition entsprechend zu berücksichtigen (Barwert zur Erstinvestition dazurechnen).
- Ist am Ende des Betrachtungszeitraums das Ende der Nutzungsdauer noch nicht erreicht, so reduziert sich die Investition I um den Barwert des Restwerts.

Aus der Division der Jahreskosten durch die geplante, mittlere jährlich erzeugte Nutzwärme ergeben sich die **Wärmegestehungskosten k:**

$$k = \frac{K}{Q_{Nutz}}$$

- k Wärmegestehungskosten [EUR/MWh; CHF/MWh]
- K Jahreskosten [EUR/a; CHF/a]
- Q_{Nutz} Jährlich erzeugte Nutzwärme [MWh/a] (in Wärmeverbünden können die Wärmegestehungskosten auch auf die gelieferte Nutzwärme bezogen werden)

Die Berechnung der Wärmegestehungskosten nach der Annuitätenmethode ist zum Beispiel auch im QM Holzheizwerke Berechnungstool Wirtschaftlichkeit (siehe Kapitel 10.7) oder der Open-Source-Software Sophena [103] enthalten. Zudem haben viele Planerinnen und Planer für die Wirtschaftlichkeitsrechnung Werkzeuge in Tabellenkalkulationsprogrammen entwickelt, mit denen sich die Wärmegestehungskosten nach der Annuitätenmethode berechnen lassen.

In der Praxis wird die Annuitätenmethode oft vereinfacht, indem der aktuelle Zinssatz für Bankkredite und Darlehen als Kalkulationszinssatz eingesetzt und die Preissteigerung (Inflation) nicht berücksichtigt wird. So wird die Annuitätenmethode zu einer statischen Betrachtung, welche die zukünftige Veränderung nicht berücksichtigt. Dies kann bei Systemen mit unterschiedlichen Kostenstrukturen zu erheblichen Fehlern führen. Wenn jedoch die Anteile der kapitalgebundenen Kostenarten ähnlich hoch sind und eine gleich hohe Preissteigerung für alle verbrauchs- und betriebsgebundenen Kostenarten über den gesamten Nutzungszeitraum angenommen werden kann, ist ein Systemvergleich mit aktuellem Zinssatz und ohne Preissteigerung im Rahmen einer Vorstudie hinreichend aussagefähig.

Für die Beurteilung, ob die gewählte Anlage und somit das vorliegende Projekt wirtschaftlich betrieben werden kann, ist dieses Verfahren alleine in der Regel nicht aus-

reichend. Um die wirtschaftliche Situation über die Anlagenlebensdauer zu beurteilen, sollte für eine Anlage mit Wärmenetz immer ein Businessplan erstellt und die wirtschaftliche Entwicklung über mehrere Jahre betrachtet werden (siehe Kapitel 10.6 und 10.7).

10.4.3 Barwertmethode (NPV) und interner Zinssatz (IRR)

Die in Kapitel 10.4.2 beschriebene Annuitätenmethode berechnet die mittleren Kosten über die Projektlaufzeit. Da Investitionen in Holzheizwerke üblicherweise eine lange Nutzungsdauer aufweisen und sich erst über die Jahre hinweg rechnen, ist es sinnvoll, die wirtschaftliche Entwicklung über einen längeren Zeitraum zu beurteilen. Hierzu eignet sich die Barwertmethode (engl. Net-Present-Value NPV-Methode) sehr gut, aus der auch der effektive (interne) Zinssatz (engl. internal rate of return IRR) der Investition berechnet werden kann. Das in Kapitel 10.7 vorgestellte Wirtschaftlichkeitstool wendet diese Methoden an.

Als interner Zinssatz wird die durchschnittliche Verzinsung des investierten Kapitals über die Nutzungsdauer bezeichnet. Die Berechnung berücksichtigt die schwankenden Erträge (Wärmeverkauf) und Aufwendungen (Energiekosten, Instandhaltung) und ermittelt eine mittlere jährliche Rendite. Es wird derjenige Zinssatz gesucht, bei dem der Kapitalwert zum Zeitpunkt der Berechnung gleich null ist [104].

$$I_0 = \sum_{t=1}^{n} \frac{e_t - a_t}{(1+i)^t} + \frac{L_n}{(1+i)^n}$$

- t Zeitindex, wobei t = 1, 2, …, n
- n Nutzungsdauer der Investition in Jahren
- i Diskontierungszinssatz (Kalkulationszinssatz)
- I_0 Auszahlungen im Zusammenhang mit der Beschaffung des Investitionsobjektes, zum Beispiel Kaufpreis einer Maschine
- a_t Auszahlungen während der Nutzungsdauer, fällig am Ende der jeweiligen Zeitperiode t, wie zum Beispiel Zahlungen für Brennstoffe, Löhne und Instandhaltung
- e_t Einzahlungen während der Nutzungsdauer, fällig am Ende der jeweiligen Zeitperiode t, wie zum Beispiel Erlöse aus dem Energieverkauf
- L_n Liquiditätserlös am Ende der Nutzungsdauer

Zur Ermittlung des internen Zinssatzes muss die obige Gleichung nach i aufgelöst werden. Bei Investitionsprojekten mit mehr als zwei Nutzungsperioden ergeben sich dabei erhebliche mathematische Lösungsschwierigkeiten, sodass mit Näherungslösungen gearbeitet werden muss. Das Vorgehen sieht wie folgt aus [104]:

- Es wird ein Kalkulationszinssatz i bestimmt, bei dem der damit berechnete Kapitalwert möglichst nahe bei null liegt, aber noch positiv ist.
- Es wird ein zweiter Kalkulationszinssatz i bestimmt, bei dem der damit berechnete Kapitalwert ebenfalls möglichst nahe bei null liegt, aber einen negativen Wert ergibt.
- Mit den beiden ermittelten Werten wird mittels Interpolation der Zinssatz berechnet, bei dem der Kapitalwert gerade null wird.

Moderne Tabellenkalkulationsprogramme wie Excel verfügen über Funktionen, welche diese Berechnungen vereinfachen.

Ist der berechnete interne Zinssatz einer Investition grösser als der Kalkulationszinssatz, so gilt die Investition als wirtschaftlich. Entsprechend gilt eine Investition als unwirtschaftlich, wenn der interne Zinssatz kleiner als der Kalkulationszinssatz ist.

10.4.4 Variantenvergleich

Zur Bestimmung der Wärmegestehungskosten eines Holzheizwerkes kann das in Kapitel 10.4.2 beschriebene Verfahren angewendet werden. Dabei ist zu unterscheiden, ob die Wärmegestehungskosten des ersten Betriebsjahres (Preissteigerung nicht relevant) oder die mittleren Wärmegestehungskosten über den Betrachtungszeitraum berechnet werden sollen (nominale Betrachtungsweise). Nur mit der nominalen Betrachtungsweise ist gewährleistet, dass die mittleren Wärmegestehungskosten über den Betrachtungszeitraum möglichst genau bestimmt werden.

Beim **Variantenvergleich eines Holzheizwerkes** können die nachfolgend beschriebenen Vereinfachungen angewandt werden.

Der Realzins stellt die über die allgemeine Teuerungsrate hinausgehende Verzinsung dar und ergibt sich näherungsweise als Differenz zwischen dem Zinssatz und der Teuerungsrate.

Beispiel: Beträgt der Nominalzins 3 % bei einer allgemeinen Teuerung von 1 %, so ergibt sich ein Realzins von 2 %. In der Schweiz liegt der Realzins im langjährigen Mittel zwischen 1 % und 3 %.

Weiter wird angenommen, dass der Ersatz der Anlagen nach Ablauf der Nutzungsdauer zu real gleichen Preisen erfolgt wie die ursprüngliche Investition. Jede Investitionskostengruppe wird innert ihrer Nutzungsdauer amortisiert (siehe Tabelle 10.2).

Mit dieser Betrachtung werden die Relationen der verglichenen Wärmeerzeugungsvarianten korrekt wiedergegeben. Es ist jedoch zu beachten, dass die ermittelten Wärmegestehungskosten aufgrund der Vereinfachungen in der Berechnung von den effektiven Kosten abweichen können.

Wird beim Vergleich der Wärmegestehungskosten unterschiedlicher Heizsysteme die Teuerung nicht berücksichtigt, so muss als Kalkulationszinssatz der reale Zinssatz eingesetzt werden.

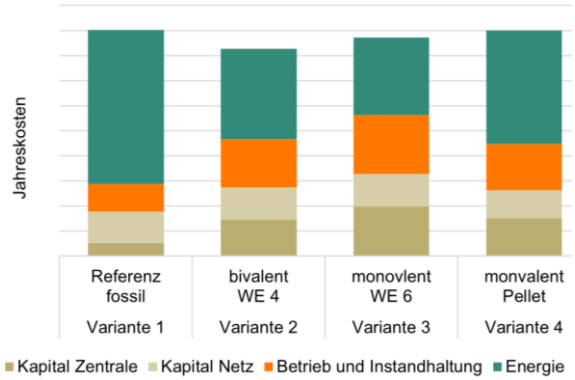


Bild 10.1 Beispiel Aufteilung der Jahreskosten in Kapital-, Betriebs- und Instandhaltungs- sowie Energiekosten.

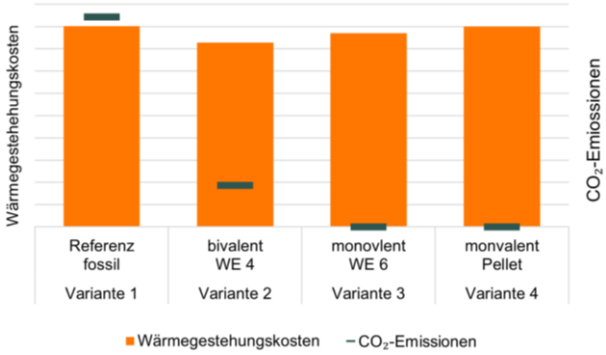


Bild 10.2 Beispiel Vergleich der Wärmegestehungskosten und der CO_2-Emissionen.

10.4.5 Sensitivitätsanalyse

Mit einer Sensitivitätsanalyse, auch Empfindlichkeitsanalyse genannt, können der Einfluss von Schwankungen einzelner Eingabeparameter auf die Ergebnisse des Variantenvergleiches dargestellt und folgende Fragen beantwortet werden:

- Welche Inputgrössen beeinflussen die Höhe der Ergebnisgrösse besonders stark?
- Innerhalb welcher Grenzen können die Werte der Inputgrössen schwanken, ohne dass der Erfolg des Unternehmens gefährdet ist?

So können zum Beispiel die Auswirkungen von Kostenüberschreitungen bei den Investitionskosten, ein geringerer Wärmeabsatz oder auch der Einfluss von schwankenden Energiepreisen, Abgaben und Steuern auf den Wärmegestehungspreis berechnet werden.

In Bild 10.3 sind für die verschiedenen Energiekosten unterschiedliche Faktoren eingetragen. Fossile Energieträger und Elektrizität werden als kritisch beurteilt und ihre Volatilität mit – 10 %/+ 20 % berücksichtigt. Die Volatilität von Energieholz dagegen wird geringer angenommen (– 5 %/+ 10 %). So wird ersichtlich, dass aufgrund der stabileren Energiekosten die Jahreskosten der erneuerbaren Wärmeerzeuger wesentlich weniger variieren als bei fossilen Energieträgern.

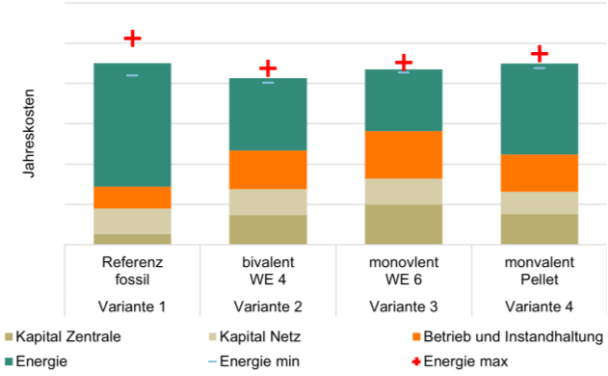


Bild 10.3 Jahreskosten mit Sensitivitätsvergleich «Energiepreise».

In Bild 10.4 erfolgt die Sensitivitätsanalyse (+ 20 %/– 10 %) anhand der Investitionskosten. Durch die wesentlich höheren Investitionen der erneuerbaren Varianten variieren die Kapitalkosten deutlich mehr als bei der Referenzvariante.

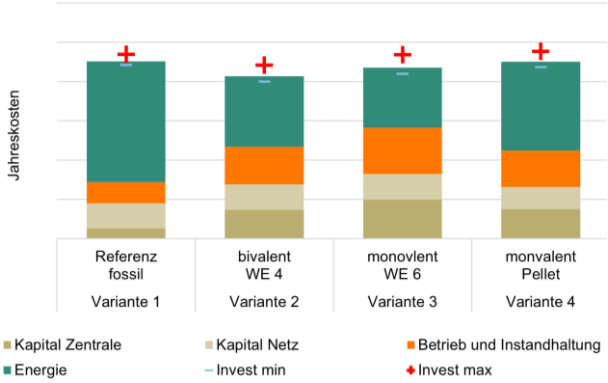


Bild 10.4 Jahreskosten mit Sensitivitätsvergleich «Investitionskosten».

10.5 Tarifstruktur Wärmeverkauf

Die in Kapitel 10.3 aufgelisteten Kosten müssen für den Wärmeverkauf entsprechend in die Tarifstruktur einfliessen. Sinnvoll ist eine Aufteilung in verbrauchsabhängige und verbrauchsunabhängige Kosten. Die Investitionen sowie die Kosten für Instandhaltung und Wartung sind weitgehend unabhängig vom Wärmeabsatz. Die Aufwendungen für den Brennstoffeinkauf und die Elektrizitätskosten für die Hilfsenergie sind abhängig von der produzierten Energie und somit verbrauchsgebundene Kosten.

Die Tarifstruktur für Fernwärme setzt sich oft aus drei oder vier Komponenten zusammen:

- **Einmalige Anschlussgebühr**: Investitionskostenanteil der Wärmebezügerin oder des Wärmebezügers für den Bau und die Hausanschlusskosten. Die Zahlung erfolgt einmalig, meist nach Fertigstellung des Hausanschlusses.
- **Jährlicher Grundpreis** pro kW abonnierter Leistung: Mit dem Grundpreis werden die verbrauchsunabhängigen Fixkosten verrechnet. In Abhängigkeit der Anschlussgebühr muss auch ein Teil der Investitionskosten als Kapitalkosten über den Grundpreis verrechnet werden.

- **Arbeitspreis**: Energiekosten für die gelieferte Wärme, abgerechnet am geeichten Wärmezähler der Wärmekundschaft. Nebst den Brennstoffkosten sind auch Kosten für die Hilfsenergie und die Netzverluste sowie weitere verbrauchsabhängige Kosten in den Arbeitspreis einzurechnen.
- **Messpreis**: Darüber hinaus kann in der Tarifstruktur auch ein Messpreis enthalten sein, der die Kosten für die Messeinrichtungen und deren Wartung/Eichung abdeckt. Der Anteil des Messpreises an der Gesamthöhe des Tarifes ist gering.

Die wiederkehrenden Preise (Grundpreis und Arbeitspreis) werden oftmals indexiert und periodisch (z. B. jährlich) angepasst. Je nach Land und Region stehen hier eine Vielzahl an Preisindizes zur Verfügung, die zum Beispiel die Preisentwicklung von Verbraucherpreisen (Konsumentenpreisen), Energiepreisen (Heizöl-, Gas-, Strom-, Energie- oder Brennholzpreise), Personal- oder Baukosten abdecken. Beispielsweise kann die Indexierung des Arbeitspreises mit einem Energie- oder Brennstoffpreisindex und diejenige des Grundpreises mit einem allgemeinen Verbraucherpreisindex (Konsumentenpreisindex) erfolgen.

Preisänderungsklauseln sind so zu gestalten, dass sie sowohl die Kostenentwicklung bei Erzeugung und Bereitstellung der Wärme durch das Unternehmen als auch die jeweiligen Verhältnisse auf dem Wärmemarkt angemessen berücksichtigen. Sie müssen die massgeblichen Berechnungsfaktoren vollständig und in allgemein verständlicher Form ausweisen [105].

Die Tarifstruktur, die Ermittlungsmethode der einzelnen Preiskomponenten und die Preisindexanpassung müssen im Wärmeliefervertrag oder einer mitgeltenden Beilage (z. B. Tarifblatt) vollständig und detailliert festgelegt werden. Bei indexierten Preisen sind neben dem Basispreis auch Name, Bezugsjahr und Quellen des Index/der Indizes, der Schwellenwert, ab welchem Anpassungen wirksam werden, und Berechnungsformeln festzulegen. Dabei sind alle Gesetze, Vorgaben und Richtlinien bezüglich der Gestaltung von Preisen und Verträgen für die Energielieferung und -abrechnung einzuhalten. Zur rechtssicheren Gestaltung eines Wärmeliefervertrages wird die Inanspruchnahme einer Rechtsberatung von darin erfahrenen Anwaltskanzleien empfohlen (auch bei kleinen Anlagen mit nur wenigen Wärmebezügerinnen/-bezügern). Der Wärmeliefervertrag und die darin enthaltenen technischen Anschlussbedingungen müssen so gestaltet werden, dass Motivation und rechtliche Möglichkeiten zur Optimierung des Lastverhaltens und der Vor- und Rücklauftemperaturen bestehen. Dazu werden zunehmend auch sogenannte «Motivationstarife» eingesetzt. Diese berücksichtigen bei der Verrechnung beispielsweise die Rücklauftemperatur oder einen spezifischen Volumenstrom, um davon abhängig einen Bonus oder Malus auf den Wärmepreis zu errechnen. Weitere Informationen zu Wärmelieferverträgen sind im Planungshandbuch Fernwärme [19] zu finden.

In Bild 10.5 ist die Verteilung der Kosten eines Wärmeverbundes auf die Tarifstruktur dargestellt. Die Aufteilung ist individuell und durch die Anlagenbetreiberin oder den Anlagenbetreiber festzulegen. Wird zum Beispiel auf eine einmalige Anschlussgebühr verzichtet, so sind die gesamten Investitionskosten inklusive Risikoanteil zu kapitalisieren und in den Grundpreis einzurechnen.

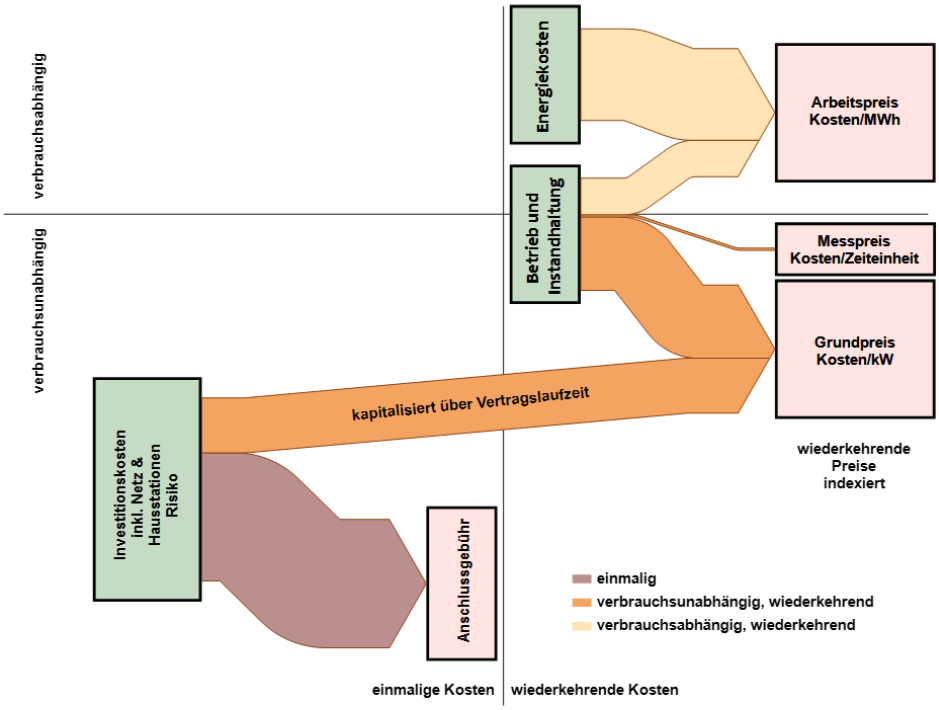


Bild 10.5 Aufteilung der Kosten auf die Tarifstruktur.

10.6 Businessplan

10.6.1 Aufbau und Inhalte

Der Businessplan beschreibt ein Unternehmenskonzept oder einen Unternehmensplan und somit eine Geschäftsidee, die in einem Unternehmen umgesetzt werden soll. Auch der Bau und Betrieb eines Holzheizwerkes – insbesondere eines Wärmeverbundes – sind in diesem Sinne ein Unternehmen und benötigen einen Businessplan. Ein Businessplan ist damit auch ein Instrument, das über die Qualität eines Unternehmens Auskunft gibt. Ein guter Businessplan hilft bei der Finanzierung und der Akquisition von Wärmekundinnen und -kunden. Für die nachfolgenden Ausführungen umfasst der Businessplan ein Dokument in folgenden zwei Teilen:

1. Textteil: Dies ist der **Businessplan** als schriftliche Formulierung der Geschäftsidee in Bezug auf Produkt, Dienstleistung, Kundschaft und Marketing. Der Businessplan gibt Auskunft über die Entwicklung des Unternehmens und ermöglicht eine Beurteilung der Risiken.

Für ein Wärmenetz ist es dabei wichtig, die Auswirkungen verschiedener Varianten des Netzausbaus aufzuzeigen.

2. Finanzteil: Planbilanz und Planerfolgsrechnung geben Auskunft über geplante Einnahmen und Ausgaben, Förderungen, Finanzierung und Liquiditätsplanung. Die Planbilanz und Planerfolgsrechnung erfolgen in der Regel über einen Zeitraum von mindestens 20 Jahren.

Der Businessplan soll in diesen zwei Teilen folgende Elemente abdecken:

- Executive Summary (maximal zwei Seiten)
- Unternehmen: Gründerteam, Unternehmensprofil, Unternehmensziele
- Produkt oder Dienstleistung: Vorteile und Nutzen für Kundinnen und Kunden, Stand der Entwicklung, Erstellung
- Branche und Markt: Branchenanalyse, Marktanalyse und Marktsegmentierung, Zielkundschaft, Wettbewerb, Standortanalyse
- Marketing: Markteintritt, Marketing- und Absatzkonzept, Absatzförderung
- Management und Schlüsselpersonen
- Umsetzungsplanung
- Chancen und Risiken
- Finanzteil: Planung für die kommenden 20 bis 25 Jahre: Personalplanung, Investitions- und Abschreibungsplanung, Plan-Gewinn- und Plan-Verlustrechnung, Liquiditätsplanung, Aufzeigen des Finanzbedarfs
- Sensitivitätsanalyse als Ergänzung zur Investitionsrechnung, in der durch Variation der wichtigsten Inputgrössen folgende Fragen beantwortet werden:
  - Welche Inputgrössen beeinflussen die Höhe der Ergebnisgrösse besonders stark?
  - Innerhalb welcher Grenzen können die Werte der Inputgrössen schwanken, ohne dass der Erfolg des Unternehmens gefährdet ist?
- Wichtige Inputgrössen sind unter anderem:
  - Fremdmittelanteil und Fremdkapitalzinsen
  - Brennstoffpreis (und sichere Versorgung)
  - Bau- und Anlagenkosten
  - Elektrizitätspreis
  - Personalkosten
  - Fördergelder

Der Businessplan sollte grundsätzlich von der Bauherrschaft verfasst werden. Einerseits ist die Bauherrschaft für die Geschäftsidee verantwortlich und andererseits ist dies die beste Basis, um den Businessplan nach aussen zu vertreten. Aufgabe der Planerin oder des Planers ist es, die Bauherrschaft bei der Erstellung des Businessplans zu unterstützen.

10.6.2 Planbilanz und Planerfolgsrechnung

Die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit eines Unternehmens kann sich nicht allein auf die Berechnung der mittleren Wärmegestehungskosten abstützen. Auch wenn über einen längeren Betrachtungszeitraum die Wärmegestehungskosten niedriger sind als die Erlöse, ist eine Kompensation von allfälligen Verlusten in den ersten Betriebsjahren durch Gewinne in späteren Jahren nicht möglich, wenn die Liquidität dazu nicht gesichert ist. Die Liquiditätssituation ist daher besonders zu beachten, wozu die Planbilanz und Planerfolgsrechnung mit Nachweis der wirtschaftlichen Situation über jedes Jahr dient.

In Kapitel 10.7 wird ein von QM Holzheizwerke entwickeltes, excelbasiertes **Tool** vorgestellt, mit welchem die wirtschaftliche Situation eines Wärmeverbundes über 25 Jahre abgebildet werden kann.

Rahmenbedingungen wie die Struktur und Anschlussdichte des Wärmenetzes beeinflussen die Wirtschaftlichkeit. Diese Daten sind von der Planerin oder dem Planer zu erfassen, sodass deren Mitwirkung beim wirtschaftlichen Optimierungsprozess sinnvoll ist.

Die **Prüfung** der Wirtschaftlichkeit und der dazugehörigen Planungsrechnungen sollte nicht nur einmalig nach der Erstellung durchgeführt werden. Stattdessen sollte die Wirtschaftlichkeitsrechnung während der gesamten Projektlaufzeit regelmässig mit den effektiven Kosten aktualisiert und geprüft werden sowie um die Prüfung möglicher Kostenoptimierungen ergänzt werden.

Bei der **Berechnung** der Planbilanz und der Planerfolgsrechnung der einzelnen Jahre sollte die Teuerung berücksichtigt werden. Die vereinfachte reale Betrachtungsweise (siehe Kapitel 10.4) ist dazu jedoch nicht zulässig, weil die Differenz zwischen Realzins und Bankzins bei hoher Inflationsrate gross wird. Dies führt zu einer entsprechend höheren Zinsbelastung in den ersten Jahren. Die Verwendung des Realzinses kann deshalb vor allem in den ersten Jahren zu einer Unterschätzung der Kapitalkosten mit entsprechendem Risiko führen.

Wird die **Teuerung** durch Verwendung des Nominalzinses ohne Preissteigerung nicht berücksichtigt, wird in der Planerfolgsrechnung die Zinsbelastung im Vergleich zu den Einnahmen etwas höher ausfallen als später in der Realität. Bei niedriger Teuerung kann diese Abweichung im Vergleich zu anderen Unsicherheiten vernachlässigt werden. Da sich die Teuerung sowohl auf die Ausgaben als auch auf die Einnahmen auswirkt, ist sie gegenüber anderen Unsicherheiten in der Regel vernachlässigbar. Die Annahmen bezüglich Zinsen und Teuerung sollten mit den kreditgebenden Institutionen besprochen und vereinbart werden.

10.7 QM Holzheizwerke Berechnungstool Wirtschaftlichkeit

QM Holzheizwerke entwickelte für die Schweiz ein einfaches Tool («QMH-Berechnungstool Wirtschaftlichkeit») zur Erstellung einer Planbilanz und Planerfolgsrechnung über eine Anlagenbetriebsdauer von 25 Jahren. Das Tool basiert auf einem Wirtschaftlichkeitsberechnungsprogramm, das vom österreichischen QM Heizwerke-Team erstellt und angeboten wird [106]. Mit diesem Tool können die Kostenentwicklung, wirtschaftliche Engpässe und der Erfolg des Projektes dargestellt werden. Folgende Fragen können unter anderem mit Hilfe des Tools beantwortet werden:

- Wie entwickelt sich das Projekt über die Betriebsdauer?
- Welches sind die wirtschaftlichen Risiken?
- Ist das Fremdkapital durch den Restwert der Anlage gesichert?
- Wie hoch sind die Wärmegestehungskosten der Wärmekunden?

Die aktuelle Version der Excel-Vorlage und Beispieldateien befinden sich im **Downloadbereich** von QM Holzheizwerke [17].

Haftungsausschluss

Das Excel-Tool *QMH-Wirtschaftlichkeitsrechnung* wurde sehr sorgfältig erstellt, trotzdem können die an der Erstellung beteiligten Personen und Institutionen keinerlei Garantie oder Gewährleistung für die ermittelten Ergebnisse und die daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen übernehmen. Durch die getroffenen Vereinfachungen ergeben sich aufgrund der Art der Berechnung bestimmte Abweichungen, zum Beispiel wird nicht berücksichtigt, ob eine Zahlung zu Jahresbeginn oder Jahresende erfolgt, da ein Jahr als eine Periode betrachtet wird.

Hinweis: Auch wenn Warnungs-Rückmeldungen bezüglich diverser Eingabegrenzen durch das Tool erfolgen, ist nicht auszuschliessen, dass durch falsche Eingabewerte eine falsche Darstellung des Endergebnisses erfolgt. Die richtige Abschätzung der Folgen bestimmter Annahmen obliegt den Personen, die das Tool nutzen.

Das Excel-Tool *QMH-Wirtschaftlichkeitsrechnung* hat verschiedene Arbeitsblätter. Die Arbeitsblätter sind mit einem Schreibschutz gesichert, alle Formeln und Berechnungen sind jedoch ersichtlich. Es ist zu beachten, dass Änderungen daran zu Fehlern an anderen Stellen und damit zu falschen Aussagen des Werkzeugs führen können.

Anstelle eines Manuals oder Handbuchs ist das Tool im Arbeitsblatt **I1_Erläuterungen** beschrieben. Die Eingabe- und Ausgabefelder sind mit den zugehörigen Erläuterungen verlinkt.

Im Arbeitsblatt **E1_Projektdaten** werden die Angaben, die das Gesamtprojekt betreffen, eingetragen. Hierzu gehören:

- Allgemeine Projektdaten, Netzverluste und anderes
- Energiepreise und Aufteilung, Betriebskosten, Teuerung
- Instandhaltungskosten
- Investitionskosten inklusive Nutzungsdauer
- Fremdfinanzierung, Darlehen und Kredite (inkl. Laufzeit und Zinssatz)
- Fördergelder.

Im Arbeitsblatt **E2_Wärmepreis** können verschiedene Tarifstrukturen (Preise und Vertragslaufzeiten) definiert werden. Die Tarife entsprechen der in Kapitel 10.5 vorgestellten Tarifstruktur.

Die Daten der Wärmebezügerinnen und -bezüger werden im Arbeitsblatt **E3_Verbraucher** erfasst. In der Tabelle können die Anschlussdaten für jede Wärmekundin und jeden Wärmekunden eingetragen werden. Die allgemeinen Daten und der Wärmebedarf können aus der Excel-Tabelle Situationserfassung übernommen oder manuell eingetragen werden. Wichtig ist, dass bei der abonnierten Leistung nicht der berechnete Leistungsbedarf, sondern die vertraglich vereinbarte Leistung eingetragen wird. Aus den Verbrauchsdaten und den Tarifen lassen sich die Jahreskosten und der Wärmegestehungspreis aus Sicht der Wärmekundschaft beziehungsweise die Einnahmen aus dem Wärmeverkauf aus Sicht des Wärmeversorgungsunternehmens berechnen.

Die Eingaben werden im Arbeitsblatt **B1_Berechnungen** zusammengetragen und über eine Projektdauer von 25 Jahren ausgewertet. Im laufenden Betrieb kann die Datei zur einfachen Kontrolle und Nachkalkulation genutzt werden, indem die effektiven Werte für den Gesamtaufwand und -ertrag eingesetzt werden.

Die wichtigsten Ergebnisse und Grafiken werden im Arbeitsblatt **A1_Ergebnisse** zusammengestellt und können auf zwei DIN-A4-Seiten ausgedruckt werden.

Im Arbeitsblatt **A2_Planerfolgsrechnung** sind die entsprechenden Ergebnisse zusammengestellt und über die Projektlaufzeit ausgewiesen.

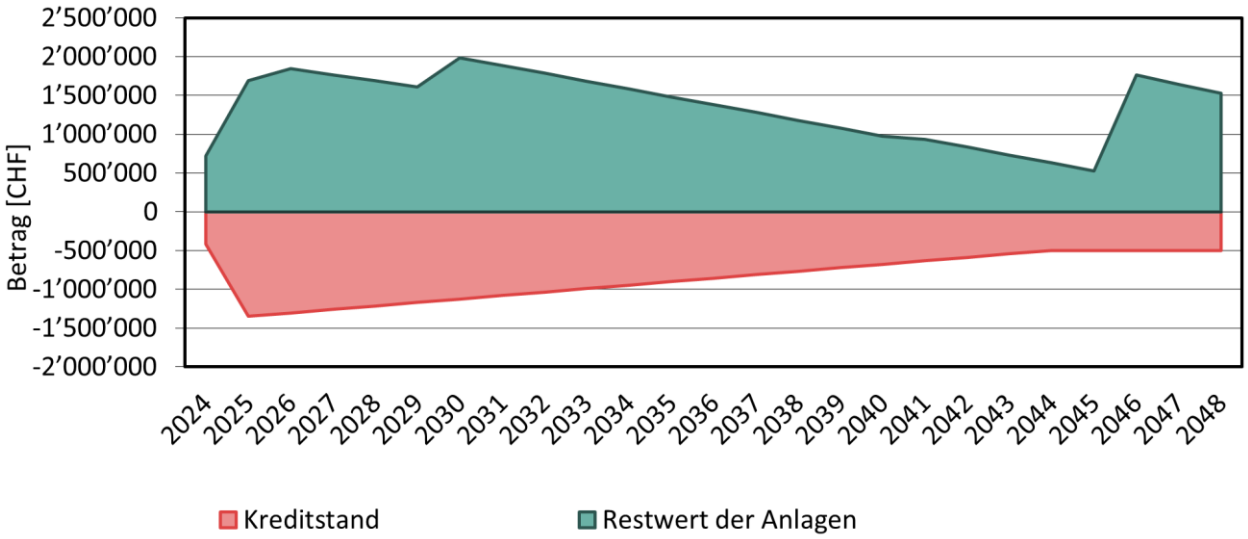


Bild 10.6 Diagramm Kreditstand, Restwert der Anlage und kumulierter Cashflow.

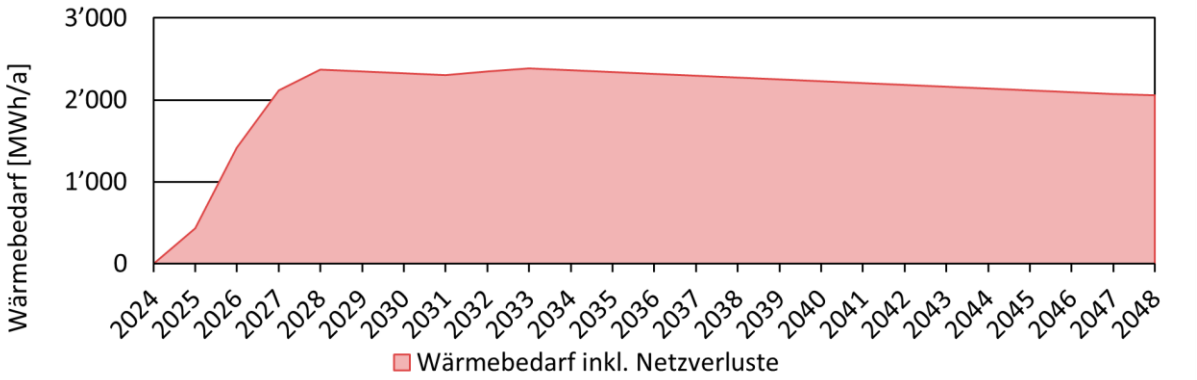


Bild 10.7 Entwicklung des Wärmeverkaufes. Aufgrund von Sanierungen und Effizienzmassnahmen der Wärmekundschaft nimmt der Wärmeverkauf über die Jahre ab, wenn keine neuen Liegenschaften angeschlossen werden.

Weitere empfehlenswerte Tools

Zusammen mit den von QM Holzheizwerke entwickelten und zur Verfügung gestellten Unterlagen gibt es weitere Berechnungswerkzeuge, die für die Auslegung und Berechnung der Wirtschaftlichkeit empfohlen werden können.

Sophena [103]
Die Open-Source-Software Sophena bietet die Möglichkeit, die technische und ökonomische Planung eines Wärmeversorgungsprojekts schnell und fundiert durchzuführen. Herzstück von Sophena ist eine Kessel- und Pufferspeichersimulation, aus welcher Jahresdauerlinien und energetische Kennzahlen ermittelt werden. Aufbauend auf diesen Berechnungen wird eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung nach VDI 2067 inkl. Ermittlung der Wärmegestehungskosten durchgeführt. Weitere Ergebnisse sind unter anderem eine Treibhausgasbilanz und die Wärmebelegungsdichte des Netzes.

THENA [107]
THENA (Thermal Network Analysis) ist ein excelbasiertes Berechnungstool und dient der einfachen technischen Analyse der Netzauslegung und einer ergänzenden Grobkostenschätzung des Wärmeverteilnetzes.

DN-Sensi [108]
Mit dem excelbasierten Berechnungstool DN-Sensi können auf einfache Art und Weise die optimale Dimensionierung sowie die Sensitivität unterschiedlicher Parameter auf die Kosten der Wärmeverteilung für Nenndurchmesser von DN 20 bis DN 250 berechnet und grafisch dargestellt werden.

10.8 Abschätzung der Investitionskosten

Anhand der folgenden Bilder lassen sich die Gesamtinvestitionskosten von Wärmeerzeugung mit Heizzentrale (siehe Bild 10.8) und Wärmenetz inklusive Hausstationen (siehe Bild 10.9) abschätzen. Die Kurven basieren auf den Angaben realisierter Anlagen aus der QM-Begleitung in der Schweiz und in Österreich im Zeitraum 2009 bis 2018. Die Grafiken bilden den Hauptteil der ausgewerteten Anlagen, welche die wichtigsten Q-Forderungen einhalten, ab. Der Schwankungsbereich ist teilweise erheblich und von unterschiedlichen Einflussfaktoren abhängig.

Hinweise

Die folgenden Diagramme sind nur als erste **Abschätzung der Investitionskosten** gedacht (Vorstudie, Machbarkeitsstudie). Sie geben Anhaltspunkte, dürfen jedoch nicht zur Bestimmung der Investitionskosten im Rahmen der vertieften Planungsphase eines Holzheizwerks eingesetzt werden. Die Diagramme dienen als Benchmark zum Vergleich mit projektspezifischen Berechnungen.

Die **EUR/CHF-Umrechnung** ist keine reine Währungsumrechnung, sondern berücksichtigt auch die **Preisunterschiede** in Österreich und der Schweiz entsprechend den Ergebnissen der ausgewerteten Anlagendaten und ist in den unterschiedlichen Preis-, Baukosten- und Lohnniveaus begründet.

Weitere Tabellen und Grafiken mit Richtpreisen für Fernwärmeleitungen und Hausstationen wurden von QM Fernwärme ermittelt und im Planungshandbuch Fernwärme [19] (Fernwärmeleitungen) sowie im Leitfaden zur Planung von Fernwärme-Übergabestationen [76] (Hausstationen) publiziert.

Richtwerte für spezifische Investitionskosten Wärmeerzeugung

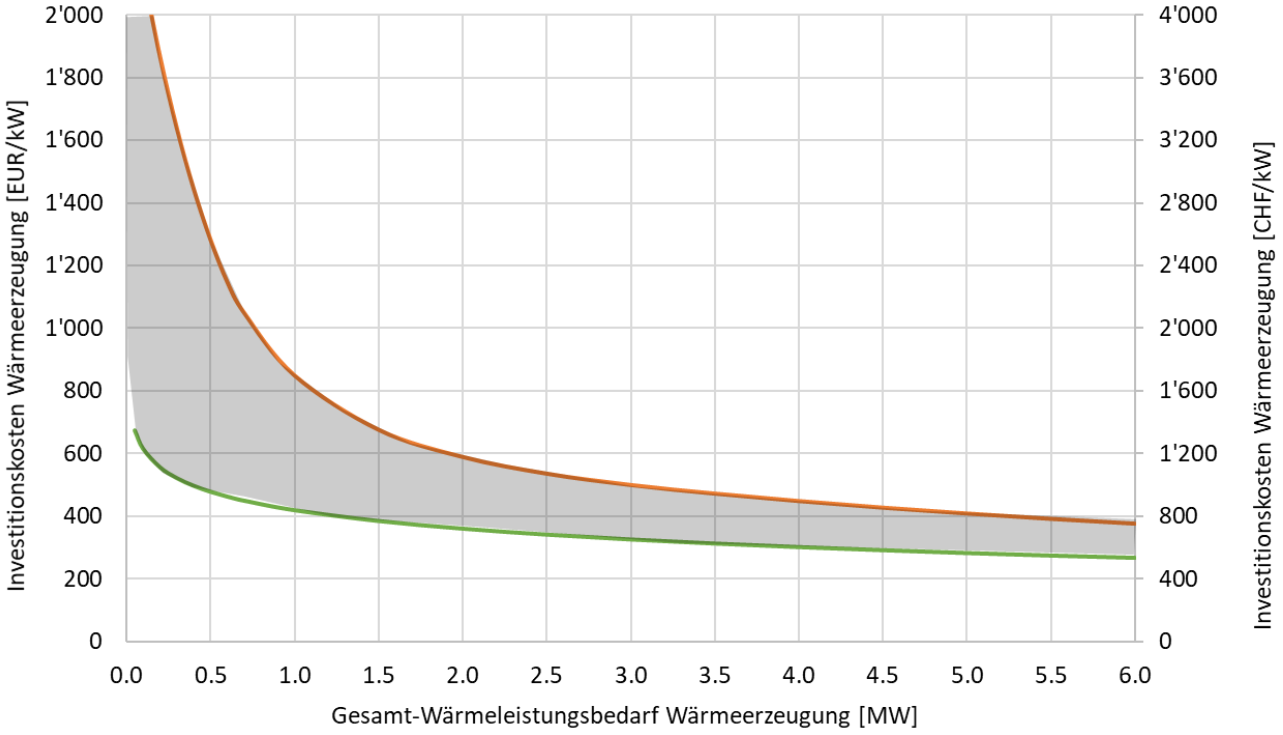


Bild 10.8 Spezifische Investitionskosten Wärmeerzeugung – Auswertung realisierter Anlagen aus AT und CH im Zeitraum 2009 - 2018.
In den Kosten enthalten sind Wärmeerzeugung, Partikelabscheider, sofern vorhanden, Economiser und/oder Kondensation, Wärmespeicher, Kaminanlage (Schornstein), hydraulische Einbindung, Elektroinstallationen, Steuerung/Regelung (MSR), Heizraum, Brennstofflager inklusive Austragung für mono- und bivalente Anlagen mit Speicher. Die Auslegung erfüllt die Q-Forderungen «E4 Wärmeerzeugung»;
EUR/CHF-Umrechnung berücksichtigt unterschiedliche Preisniveaus in AT und CH.

Richtwerte für spezifische Investitionskosten Wärmeverteilung

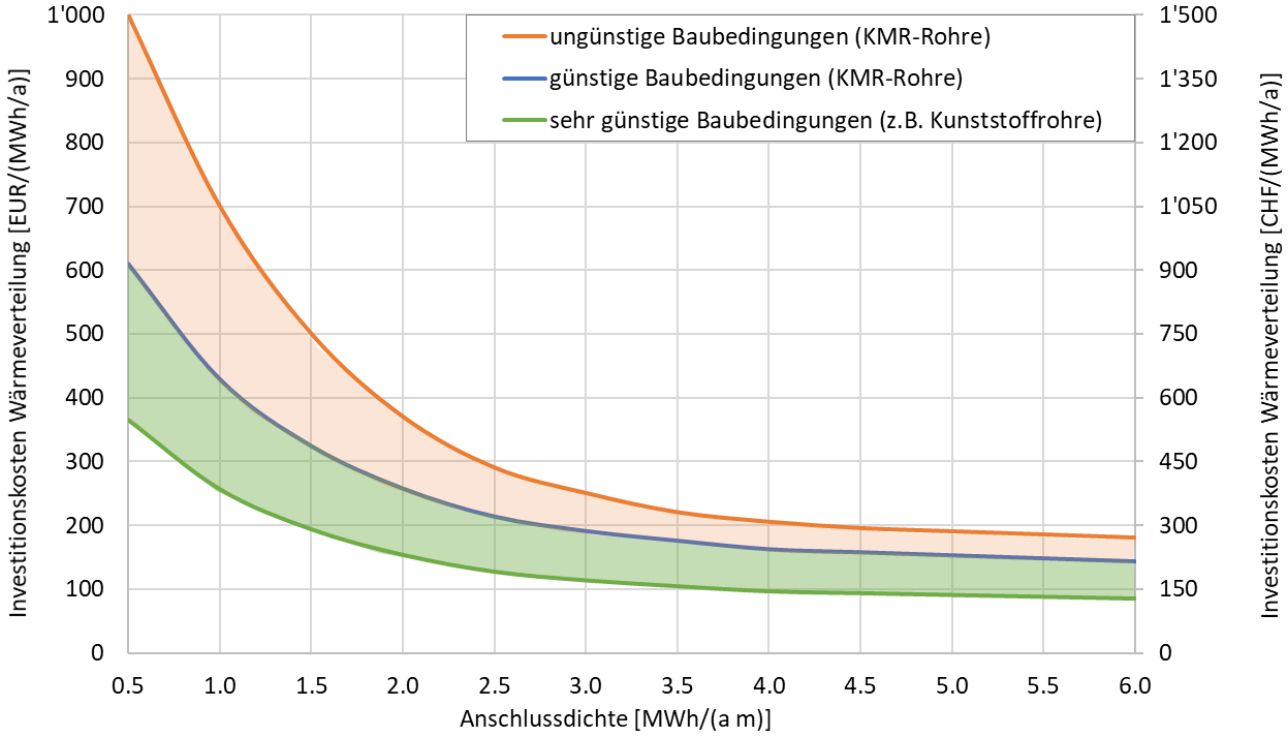


Bild 10.9 Spezifische Investitionskosten Wärmeverteilung – Auswertung realisierter Anlagen aus AT und CH im Zeitraum 2009 - 2018.
In den Kosten enthalten sind die Fernleitungsgruppe in der Heizzentrale, das Fernleitungsnetz inklusive Grabarbeiten sowie die Hausanschlüsse bis und mit Wärmeübergabestationen (ohne Hauszentrale);
EUR/CHF-Umrechnung berücksichtigt unterschiedliche Preisniveaus in AT und CH.

Teil 3 – Planungsablauf

11 Situationserfassung

11.1 Einleitung

Die Analyse der Ist-Situation (Situationserfassung) ist die Basis für die Systemwahl, um ein geeignetes Wärmeerzeugungs- und Wärmeverteilsystem für das zu versorgende Gebäude oder Areal zu definieren.

Die **Situationserfassung ist die wichtigste Grundlage für alle weiterführenden Planungsschritte** und hat massgeblichen Anteil an einem erfolgreichen Projektverlauf und Anlagenbetrieb. Die Überschätzung des Leistungs- und Wärmebedarfs und die damit verbundene Überdimensionierung von Anlagen können massive negative technische und wirtschaftliche Auswirkungen auf ein Projekt haben.

Dementsprechend ist bereits in einer frühen Planungsphase grosses Augenmerk auf die Durchführung der Situationsanalyse zu legen. Die Durchführung obliegt erfahrenen Planerinnen und Planern und sollte von unabhängiger Stelle auf Plausibilität geprüft werden (z. B. Qualitätsbeauftragte von QM Holzheizwerke).

Die Situationserfassung umfasst in einem ganzheitlichen Ansatz die Ermittlung des aktuellen und zukünftigen Wärme- und Kältebedarfs sowie die Evaluierung aller möglichen erneuerbaren und regional verfügbaren Wärmequellen. Als Ergebnis liefert die Situationserfassung den Jahreswärmebedarf der Gesamtanlage für verschiedene Versorgungs- und Ausbauszenarien sowie die entsprechenden Lastgang- und Jahresdauerlinien für die weiterführende Systemwahl (siehe Kapitel 13).

QM Holzheizwerke und **QM Fernwärme** bieten hierzu hilfreiche Dokumente und Tools an:

- Detaillierter **Projektablauf** gemäss QM Holzheizwerke im Q-Leitfaden ([15]), in Teil 3 des vorliegenden Planungshandbuchs und im Planungshandbuch Fernwärme ([19], Seite 102 ff.)
- **Fragebogen** für einen Fernwärmeanschluss als Vorlage-Dokument in Word [109]
- Excel-Tabelle **Situationserfassung** [110] für die Plausibilitätskontrolle für jeden Wärmeabnehmer und für die Gesamtanlage. In der Excel-Tabelle Situationserfassung wird die Systemwahl für die Wärmeerzeugung anhand der Zielwerte von QM Holzheizwerke direkt bewertet.

Es wird empfohlen, alle relevanten Projektbeteiligten möglichst frühzeitig miteinzubeziehen. Dazu gehören Standortgemeinde, Standortkanton respektive Bundesland, Betriebsgesellschaft (z. B. Contractor), Wärmekundinnen und -kunden, Brennstoff- und Energieversorgungsunternehmen und indirekt Beteiligte wie Anwohnerinnen und Hauseigentümer, Vereine, regionale Energieagenturen, Wirtschafts- und Holzenergie-Fachverbände. Detailliert beschrieben sind die relevanten Projektbeteiligten in den Berichten «Risiken bei thermischen Netzen» [20] und «Sozioökonomische Aspekte thermischer Netze» [18].

Erforderliche Arbeitsschritte

Folgende **Arbeitsschritte müssen** je nach Projektfortschritt und Meilenstein entsprechend QM Holzheizwerke in unterschiedlichem Genauigkeitsgrad vorliegen oder definiert werden:

- In der Vorstudie oder in der Projektentwicklung erfolgt eine erste grobe Voranalyse des **Versorgungsgebiets**. Dabei sind vorhandene Potenziale von Wärmequellen und Wärmesenken (Wärmebedarf) abzuklären. Dafür bieten sich Informationsquellen wie Leitfäden und Empfehlungen zur Energieplanung, Geoinformationssysteme (GIS) oder Katasterpläne an (siehe auch Kapitel 12):
  - Leitfaden kommunale Wärmeplanung von KEA [111]
  - Module für die räumliche Energieplanung von Energiestadt [112]
  - Tool PETA 5.1 [113]
  - Tool THERMOS [114]
  - Tool Hotmaps-Toolbox [115]
  - Infokarte map.geo.admin.ch [116]
  - Tool webGIS für die Schweiz [117].
- Abstimmung und Abklärung potenzieller Versorgungsgebiete mittels vorhandener nationaler, regionaler und kommunaler **Energiestrategien** oder **Energierichtpläne**. Im Programm Heat Roadmap Europe [118] wurden auf europäischer Ebene Strategien für CO_2-neutrales Heizen und Kühlen aufgearbeitet.
- Abklärung des Interesses bei den wichtigsten **Schlüsselkundinnen und -kunden**
- Analyse, Auswertung und Plausibilitätskontrolle der Daten, zum Beispiel mit der **Excel-Tabelle Situationserfassung** [110] von QM Holzheizwerke.
- Durchführung einer vertieften Wärmebedarfs- und Interessensermittlung durch Haus-zu-Haus-Befragungen, Informationsveranstaltungen und Fragebogen zur Erhebung der **Detaildaten** (Kapitel 11.2, Bedarf einzelner Wärmeabnehmer)
- Aktualisierung der Analyse und Aufbereitung verschiedener sinnvoller **Varianten** zur Wärmeversorgung. Die Variantenauswahl basiert auf folgenden Kriterien:
  - Verfügbarkeit lokaler und erneuerbarer Energieträger
  - Geforderter minimaler Anteil erneuerbarer Energieträger
  - Abdeckung der Spitzenlast
  - Investitions- und Betriebskosten
  - Vorhandener Bedarf von Kühlenergie
- Prozess je nach Projektfortschritt und Meilenstein wiederholen und Genauigkeitsgrad erhöhen (iterativer Prozess).

Ergebnis der Situationserfassung
Jahreswärmebedarf der Gesamtanlage für verschiedene Versorgungs- und Ausbauszenarien sowie die entsprechenden Lastgang- und Jahresdauerlinien für die weiterführende Systemwahl (siehe Kapitel 13)

11.2 Analyse des Wärmebedarfs

11.2.1 Neubauten

Der **Jahreswärmebedarf für Raumwärme** sollte gemäss EN ISO 52016 [119] berechnet werden. Gegebenenfalls sind weitere gleichwertige nationale Normen und Richtlinien heranzuziehen. Wärmegewinne durch Sonneneinstrahlung, Personen, elektrische Geräte und andere mehr werden in dieser Norm berücksichtigt.

Die Berechnung des **Jahreswärmebedarfs für Warmwasser** erfolgt üblicherweise aufgrund einer vorgegebenen Standardnutzung. Dazu können neben Tabelle 11.1 die entsprechenden nationalen Normen und Richtlinien herangezogen werden (siehe Kapitel 19).

Der **Norm-Wärmeleistungsbedarf für die Raumwärme** sollte gemäss EN 12831 [120] berechnet werden. Für die Berechnung können auch weitere gleichwertige nationale Normen und Richtlinien herangezogen werden. Wärmegewinne durch Sonneneinstrahlung, Personen, elektrische Geräte und andere mehr werden in dieser Norm nicht berücksichtigt. Zum Ausgleich der Auswirkungen einer intermittierenden Beheizung kann eine zusätzliche Aufheizleistung berücksichtigt werden. Ohne zusätzliche Aufheizleistung erhält man einen 24-Stunden-Mittelwert ohne Berücksichtigung von Wärmegewinnen.

Der Mittelwert des Wärmeleistungsbedarfs für **Warmwasser** berechnet sich aus dem Wärmebedarf für Warmwasser dividiert durch die Heizstundenzahl (Winterbetrieb) beziehungsweise 8’760 Stunden (Ganzjahresbetrieb). Der Spitzenwert des Wärmeleistungsbedarfs für Warmwasser ergibt sich aus der Anschlussleistung des Warmwasserbereiters. Da meistens Speicher-Warmwasserbereiter mit einer Vorrangschaltung eingesetzt werden, genügt es in der Regel, wenn der Jahreswärmebedarf für Warmwasser durch 4’000 bis 6’000 Stunden dividiert wird. Beim Einsatz von Durchlauferhitzern beziehungsweise Durchflusswassererwärmern oder Frischwasserstationen ist die Vollbetriebsstundenzahl allenfalls zu reduzieren. Damit wird eine höhere Spitzenlast berücksichtigt als der theoretische Mittelwert, weil die Spitzenlast an gewissen Tagen höher sein kann als der Mittelwert und vom Wochentag und von der Jahreszeit abhängig ist.

Der **Temperaturbedarf** ergibt sich aus der Auslegung der Wärmeabgabe und der Warmwasserbereitung. Die Auslegung von Heizkörpern, Fussbodenheizung und Wärmeübertragern basiert in der Regel auf Herstellerangaben.

11.2.2 Bestehende Bauten

Die Berechnung des gesamten **Jahreswärmebedarfs** erfolgt in der Regel aufgrund des bisherigen Endenergieverbrauchs (z. B. bisheriger Heizölverbrauch) und des Nutzungsgrades des bisherigen Wärmeerzeugers. Daraus wird eine Aufteilung in Raumwärme, Warmwasser und Prozesse vorgenommen (siehe Tabelle 11.1). Nicht zu empfehlen ist es, die Leistung entsprechend bisher installierter Kesselanlagen zu wählen, den Energie- und Leistungsbedarf aus dem Energieausweis zu entnehmen oder auf eine grobe und unqualifizierte Abschätzung zu vertrauen.

Wenn keine zuverlässigen Daten über den bisherigen Verbrauch vorliegen oder keine zuverlässige Aufteilung in Raumwärme, Warmwasser und Prozesse möglich ist, sind Messungen oder eine qualifizierte Abschätzung vorzunehmen.

Die beste Methode zur Ermittlung des **Wärmeleistungsbedarfs** ist die Bestimmung der Lastkennlinien mit Hilfe von Messungen. Dies ist bei kleinen Wärmeverbrauchern meist mit zu grossem Aufwand verbunden, jedoch insbesondere bei grosser Wärmeabnahme und bei Prozesswärmeanlagen unbedingt zu empfehlen. Frühzeitige Planung ist in diesen Fällen wichtig, da Messungen nur möglich sind, wenn genügend Zeit zur Verfügung steht und eine funktionsfähige Wärmeerzeugungsanlage vorhanden ist.

Brauchbare bestehende **Wärmeleistungsbedarfsrechnungen** sind erfahrungsgemäss kaum vorhanden oder beruhen auf veralteten Berechnungsmethoden. Neuberechnungen scheitern vielfach an fehlenden Plänen mit den notwendigen Angaben zum detaillierten Gebäudeaufbau.
Der Wärmeleistungsbedarf wird am häufigsten aus dem bisherigen Wärmebedarf ermittelt:

- Maximaler Wärmeleistungsbedarf für **Raumwärme**: Division des Heizwärmebedarfs durch eine geeignete Vollbetriebsstundenzahl (Erklärung und Einschränkungen siehe Kasten «Vollbetriebsstundenzahl Raumwärme»)
- Mittlerer Wärmeleistungsbedarf für **Warmwasser**: Division des Wärmebedarfs durch die Heizstundenzahl (Winterbetrieb) beziehungsweise 8’760 Stunden (Ganzjahresbetrieb). Damit eine höhere Spitzenlast berücksichtigt wird als der theoretische Mittelwert, wird der Jahreswärmebedarf für Warmwasser in der Regel durch 4’000 bis 6’000 Stunden dividiert.
- Wärmeleistungsbedarf für **Prozesswärme**: Division des Wärmebedarfs durch eine geeignete Vollbetriebsstundenzahl, welche unter Berücksichtigung von Betriebszeiten, Aufheizspitzen, Pausen, Nachtabsenkung und Wochenenden situativ zu bestimmen oder abzuschätzen ist. Zu beachten ist, dass in der Excel-Tabelle Situationserfassung die Prozesswärme gemittelt über die Betriebsstunden pro Jahr betrachtet wird (Tagesmittelwerte). Somit werden maximale Leistungsspitzen nicht berücksichtigt. Diese Angaben allein genügen dann in manchen Fällen nicht zur Anlagendimensionierung.

Eine Abschätzung des **Temperaturbedarfs** allein aufgrund der vorhandenen Wärmeabgabesysteme wie Fussbodenheizungen, Heizkörperheizungen oder Warmwasserbereiter ist möglich. Empfohlen werden jedoch Temperaturmessungen bei den einzelnen Wärme-

abnehmerinnen und -abnehmern bei kalten Aussentemperaturen und Hochrechnung der gemessenen Wertepaare (Vorlauf-/Rücklauftemperatur, Aussentemperatur) auf Auslegewerte.

Bevorstehende **Energiesparmassnahmen** sind im Zuge der Situationserfassung zu erheben und im Jahreswärmebedarf, im Wärmeleistungsbedarf und im Temperaturbedarf zu berücksichtigen.

Exkurs Vollbetriebsstundenzahl Raumwärme
Die Vollbetriebsstundenzahl für Raumwärme [h/a] (auch «Vollbetriebsstunden» oder «Vollbenutzungsstunden» genannt) ist das Verhältnis des Nutzenergiebedarfs für Raumwärme in kWh/a zum maximalen Wärmeleistungsbedarf für Raumwärme in kW. Die Vollbetriebsstundenzahl ist abhängig von der Jahresdauerlinie der Aussentemperatur am Anlagenstandort, der Heizgrenze und der Grösse des nicht witterungsabhängigen Anteils des Wärmeleistungsbedarfs.

Je nach Gebäudestandard und Nutzungsart ergeben sich andere Werte, welche insbesondere bei Nichtwohnbauten aufgrund des eingeschränkten Betriebs und der Wiederaufheizung sowie vom Wohnbau abweichender Raumtemperaturen und innerer Lasten zum Teil schwer abschätzbar sind (siehe dazu den in der Tabelle 11.1 aufgeführten Vergleich zwischen Wohn- und Nichtwohnbauten). Dementsprechend gelten die in Tabelle 11.2 angegebenen Vollbetriebsstundenzahlen nur für **bestehende Wohnbauten** (Raumwärme ohne Warmwasser), die vor etwa 1990 erbaut wurden. Auf **Neubauten** und sehr gut wärmegedämmte bestehende Wohnbauten mit Heizgrenzen < 15 °C sowie Nichtwohnbauten dürfen diese Vollbetriebsstundenzahlen nicht angewendet werden; hier ergeben sich tiefere Werte.

Die Vollbetriebsstundenzahl ist grundsätzlich als Hilfsmittel zur Abschätzung des Wärmeleistungsbedarfs und zur Plausibilitätskontrolle gedacht. Je nach Situation, Leistungsbedarf und Verwendungszweck ist diese Methode für einen Investitionsentscheid jedoch nicht ausreichend und bedarf einer genaueren Abklärung des Leistungsbedarfs auf Basis der EN 12831-1 [120] oder bei bestehenden Bauten mit Hilfe von Messungen (siehe Kapitel 11.2.1 respektive 11.2.2).

11.2.3 Baugebiete

Sofern für Baugebiete noch keine genaue Bauplanung und somit keine Möglichkeit zur Berechnung vorliegt, erfolgt die näherungsweise Ermittlung des **Wärmebedarfs** aufgrund der Energiebezugsfläche und des spezifischen Heizwärmebedarfs. Der spezifische Heizwärmebedarf sollte entsprechend dem aktuellen und dem zukünftig zu erwartenden Baustandard, aber keinesfalls zu hoch angesetzt werden. Der spezifische Wärmebedarf Warmwasser wird gemäss einer Standardnutzung in die Rechnung eingesetzt.

Analog zu den bestehenden Bauten ist eine Berechnung des **Wärmeleistungsbedarfs** aus dem (hier geschätzten) Wärmebedarf möglich. Die Abschätzung des **Temperaturbedarfs** erfolgt auf Basis der zu erwartenden Wärmeabgabesysteme.

Tabelle 11.1 Vergleich Wohnbau mit ausgewählten Nichtwohnbauten.

	Wohnungsbau	**Läden und Restaurants**	**Hotels ohne Wellnessbereich**	**Hallenbäder und Wellnessbereiche in Hotels**
Probleme	• Wärmeleistungsbedarfsrechnung ohne Wärmegewinne, diese sind aber relativ gut bekannt und werden in der Excel-Tabelle Situationserfassung berücksichtigt • Relativ gut bekannter, gleichmässiger Warmwasserbedarf • Kein eingeschränkter Betrieb, oder nur während der Nacht	• Oft unzuverlässige Wärmeleistungsbedarfsrechnung • Oft schlecht bekannte Abwärmelasten • Hohe Lufterhitzer-Anschlussleistungen • Eingeschränkte Betriebszeiten bezüglich Tag und Woche • Warmwasserverbrauch in Restaurants hoch und in Läden tief (aber je nach Branche unterschiedlich)	• Wärmeleistungsbedarfsrechnung wie Wohnungsbau, die Wärmegewinne sind aber weniger gut bekannt • Stark unterschiedliche, saisonabhängige Betriebszeiten und Belegungen möglich • Hohe Warmwasserspitzen, wie sie im normalen Wohnungsbau nicht vorkommen	• Oft unzuverlässige Wärmeleistungsbedarfsrechnung • Oft schlecht bekannte Abwärmelasten • Hohe Anschlussleistungen der Badewasser-Wärmeübertrager • Eingeschränkte Betriebszeiten bezüglich Tag, Woche und Jahr • Grosser täglicher Warmwasserverbrauch mit hohem Spitzenbedarf
Raumwärme				
Spezifischer Wärmebedarf	Mittelland/Flachland Bestand 100 kWh/(m²*a) Best. Bau 80 kWh/(m²*a) Neubau 40 kWh/(m²*a) Bergregion Bestand 120 kWh/(m²*a) Best. Bau 100 kWh/(m²*a) Neubau 50 kWh/(m²*a)	Mittelland/Flachland Best. Bau 80 kWh/(m²*a) Neubau 40 kWh/(m²*a) Bergregion Best. Bau 100 kWh/(m²*a) Neubau 50 kWh/(m²*a)	Mittelland/Flachland Best. Bau 80 kWh/(m²*a) Neubau 40 kWh/(m²*a) Bergregion Best. Bau 100 kWh/(m²*a) Neubau 50 kWh/(m²*a) Mit Betriebsunterbrüchen tiefere Werte möglich	Mittelland/Flachland Best. Bau 300 kWh/(m²*a) Neubau 150 kWh/(m²*a) Bergregion Best. Bau 375 kWh/(m²*a) Neubau 190 kWh/(m²*a) (inklusive Warmwasser und Badewassererwärmung)
Vollbetriebsstundenzahl	Mittelland/Flachland Bestand 2'000 h/a Best. Bau 2'000 h/a Neubau 1'200 h/a Bergregion Bestand 2'500 h/a Best. Bau 2'500 h/a Neubau 1'500 h/a	Mittelland/Flachland Best. Bau 1'350 h/a Neubau 800 h/a Bergregion Best. Bau 1'700 h/a Neubau 1'000 h/a	Mittelland/Flachland Best. Bau 2'000 h/a Neubau 1'200 h/a Bergregion Best. Bau 2'500 h/a Neubau 1'500 h/a Mit Betriebsunterbrüchen tiefere Werte möglich	Mittelland/Flachland Best. Bau 2'000 h/a Neubau 1'200 h/a Bergregion Best. Bau 2'500 h/a Neubau 1'500 h/a (inklusive Warmwasser und Badewassererwärmung)
Spezifischer Leistungsbedarf	Mittelland/Flachland Bestand 50 W/m² Best. Bau 40 W/m² Neubau 30 W/m² Bergregion Bestand 50 W/m² Best. Bau 40 W/m² Neubau 30 W/m²	Mittelland/Flachland Best. Bau 60 W/m² Neubau 50 W/m² Bergregion Best. Bau 60 W/m² Neubau 50 W/m²	Mittelland/Flachland Best. Bau 40 W/m² Neubau 30 W/m² Bergregion Best. Bau 40 W/m² Neubau 30 W/m² Mit Betriebsunterbrechungen gleiche Werte notwendig	Mittelland/Flachland Best. Bau 150 W/m² Neubau 125 W/m² Bergregion Best. Bau 150 W/m² Neubau 125 W/m² (inklusive Warmwasser- und Badewassererwärmung)
Warmwasser				
Spezifischer Wärmebedarf	Einfamilienhaus (EFH): 15 - 20 kWh/(m2*a) Mehrfamilienhaus (MFH): 25 - 30 kWh/(m2*a)	Restaurants höhere Werte als Wohnungsbau: 30 - 70 kWh/(m2*a) Verkaufsläden tiefere Werte als Wohnungsbau: 5 - 15 kWh/(m²*a)	Wesentlich höhere Werte als MFH, wird aber möglicherweise durch eine tiefe Belegung kompensiert: 30 - 50 kWh/(m²*a)	Warmwasserbereitung und Badewassererwärmung sind in den oben aufgeführten Kennzahlen enthalten. Mit Hilfe dieser Kennzahlen kann nur der approximative Gesamtbedarf abgeschätzt werden.
Vollbetriebsstundenzahlen	Nicht 8'760 h/a, da der tägliche Verbrauch unterschiedlich ist; Empfehlung: 4'000 - 6'000 h/a	Tiefere Werte als Wohnungsbau (höhere Leistungsspitzen): 2'000 - 3'000 h/a	Tiefere Werte als Wohnungsbau (höhere Leistungsspitzen): 2'000 - 3'000 h/a	
Spezifischer Leistungsbedarf	Einfamilienhaus (EFH): 5 W/m² Mehrfamilienhaus (MFH): 8 W/m²	Restaurants höhere Werte als Wohnungsbau: 25 W/m² Verkaufsläden tiefere Werte als Wohnungsbau: 5 W/m²	Der spez. Warmwasserbedarf ist wesentlich höher als im MFH: 15 - 25 W/m²	

Tabelle 11.2 Vollbetriebsstundenzahlen für bestehende Wohnbauten (Raumwärme ohne Warmwasser). Auf Neubauten und sehr gut wärmegedämmte bestehende Gebäude mit Heizgrenzen < 15 °C und Nichtwohnbauten dürfen diese Vollbetriebsstundenzahlen nicht angewendet werden (Hinweise zur Anwendung im Kasten).

Ort	Vollbetriebsstundenzahlen für Wohnbauten mit Hilfe der Excel-Tabelle Situationserfassung berechnet	Vollbetriebsstundenzahlen für Wohnbauten üblicherweise verwendete Werte in den einzelnen Ländern
Zürich (CH)	2'050 h/a *	2'000 - 2'100 h/a *
Davos (CH)	2'800 h/a *	2'600 - 3'000 h/a *
Locarno-Monti (CH)	1'800 h/a *	1'700 - 1'900 h/a *
Graz Universität (AT)	1'900 h/a **	1'800 - 1'875 h/a ***
Tamsweg (AT)	2'350 h/a **	1'766 - 1'840 h/a ***
Wien Innere Stadt (AT)	1'700 h/a **	1'714 - 1'813 h/a ***
München-Flughafen (DE)	2'050 h/a **	1'913 h/a ****
Karlsruhe (DE)	1'750 h/a **	1'611 h/a ****

* Langjährige Erfahrungswerte aus der Schweiz. Die Zahlen werden teilweise in kantonalen Energieverordnungen vorgeschrieben.

** Die Zahlen für Österreich und Deutschland wurden allein aufgrund der Jahresdauerlinie mit der Excel-Tabelle Situationserfassung auf der Basis der schweizerischen berechnet. Diese Werte sollten in Deutschland und Österreich nur als Vergleichszahlen verwendet werden.

*** Quelle: Handbuch für Energieberater, JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH, Ausgabe Oktober 1994

**** Quelle: Recknagel/Sprenger/Hönmann, Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik 1990/1991.

11.3 Wärmebedarf der Gesamtanlage

11.3.1 Bestimmung des Wärmeleistungsbedarfs

Bei der Bestimmung des Wärmeleistungsbedarfs der Gesamtanlage aus dem Zahlenmaterial der einzelnen Wärmeabnehmer ergeben sich oft folgende Probleme:

- Der Wärmeleistungsbedarf für die Gesamtanlage ergibt sich aus einer Mischung von berechneten Werten mit mehr oder weniger grossen **Sicherheitszuschlägen** und realen Messwerten ohne Sicherheitszuschläge.
- Der Norm-Wärmeleistungsbedarf für die Raumwärme, berechnet gemäss EN 12831-1 [120], basiert auf einer Norm-Aussentemperatur. Im Gegensatz dazu beziehen sich messtechnisch bestimmte Lastkennlinien auf **reale Aussentemperaturen**.
- Der Norm-Wärmeleistungsbedarf für die Raumwärme, berechnet gemäss EN 12831-1 [120], berücksichtigt keine **internen und externen Wärmegewinne** durch Sonneneinstrahlung, Personen oder elektrische Geräte und andere mehr. Im Gegensatz dazu berücksichtigen messtechnisch bestimmte Lastkennlinien Wärmegewinne korrekt.
- Zur Abschätzung des Wärmeleistungsbedarfs für Raumwärme bei bestehenden Bauten aus dem Wärmebedarf wird eine Vollbetriebsstundenzahl benötigt, die abhängig ist von der Jahresdauerlinie der Aussentemperatur am Standort der Anlage, der Raumtemperatur, der Heizgrenze und der Grösse des nicht witterungsabhängigen Anteils. **Welche Vollbetriebsstundenzahlen** sollen eingesetzt werden?
- Die Berechnung von **zusätzlichen Aufheizleistungen** zum Ausgleich der Auswirkungen einer intermittierenden Beheizung (z. B. Aufheizung am Montagmorgen bei einem Bürogebäude nach reduziertem Wochenendbetrieb) wird oft nicht berücksichtigt.
- Messtechnisch bestimmte Lastkennlinien können für unterschiedliche Lastfälle durch Regression von Tagesmittelwerten bis zu 1-Stunden-Mittelwerten erstellt werden. Dabei muss beachtet werden, dass messtechnisch bestimmte Spitzenlasten nicht allein von der Wärmeabnahme, sondern auch vom Wärmeerzeuger (allfällige Über- oder Unterdimensionierung) sowie dem Standort der Messstelle abhängen.
- Messtechnisch bestimmte Lastkennlinien zeigen oft einen erheblichen **nicht witterungsabhängigen Anteil des Wärmeleistungsbedarfs**. Wie soll dieser nicht witterungsabhängige Anteil des Wärmeleistungsbedarfes für die Raumwärme bei Neubauten berücksichtigt werden?
- Der Mittelwert des **Wärmeleistungsbedarfs Warmwasser** (Jahres-Wärmebedarf Warmwasser dividiert durch 8'760 Stunden) ist etwas völlig anderes als der Spitzenwert des Wärmeleistungsbedarfs Warmwasser (Anschlussleistung des Warmwasserbereiters). Der Warmwasserverbrauch ist oft von Tag zu Tag unterschiedlich und vom Wochentag und von der Jahreszeit abhängig.

Zu beantwortende Fragen

Um die Zahlen für die Gesamtanlage aus einer Mischung von Berechnungen und realen Messwerten möglichst realitätsnah zu bestimmen, sind folgende Fragen zu beantworten:

- Wie werden Wärmegewinne bei Neubauten berücksichtigt?
- Welches sind die geeigneten Vollbetriebsstundenzahlen zur Bestimmung des Wärmeleistungsbedarfs für Raumwärme aufgrund des bisherigen Wärmebedarfs bei bestehenden Bauten?
- Wie soll der nicht witterungsabhängige Anteil des Wärmeleistungsbedarfes für die Raumwärme berücksichtigt werden?
- Wie weit werden zusätzliche Aufheizleistungen zum Ausgleich der Auswirkungen einer intermittierenden Beheizung in der Gesamtanlage berücksichtigt?
- Auf welche Aussentemperatur bezieht sich die Gesamtanlage?

11.3.2 Wärmeleistungsbedarf als Lastkennlinie dargestellt

Die Darstellung des Wärmeleistungsbedarfs als Lastkennlinie mit möglichst realen Aussentemperaturen bedarf empirisch gestützter Grundlagen und ist aus der Praxis mit Messungen bei Sanierungen und Erweiterungen von grösseren Haustechnikanlagen hervorgegangen. Der grosse Vorteil ist, dass die Mischung von Zahlenmaterial aus Berechnungen aus dem bisherigen Energieverbrauch und aus Messungen übersichtlich dargestellt werden kann. Diese Methode wird in der Excel-Tabelle Situationserfassung [110] von QM Holzheizwerke umgesetzt und angewendet.

Die Methode basiert auf folgenden grundsätzlichen Überlegungen:

- Raumwärme, Warmwasser und Prozesse müssen für jeden Wärmeabnehmer separat betrachtet werden.
- Für übliche Wohnbauten wird der Tagesmittelwert für den Wärmeleistungsbedarf Raumwärme in die Berechnung eingesetzt. Die Erfahrungen und zahlreiche Messungen zeigen, dass die bei einer bestimmten Aussentemperatur (ebenfalls Tagesmittelwert) notwendige Raumwärme in Wohnbauten irgendwann innerhalb von 24 Stunden – gewissermassen in «Paketen» – zugeführt werden kann. Es genügt, wenn die Bilanz nach jeweils 24 Stunden wieder stimmt. Sogenannte Nachtabsenkungen sind deshalb bei üblichen Wohnbauten kaum bemerkbar. Dies gilt vor allem für Wohnbauten, die nach 1985 errichtet wurden, sowie für ältere wärmetechnisch gut sanierte Gebäude. Bei sehr tiefen Aussentemperaturen können zudem Nachtabsenkungen notfalls auch ausgeschaltet werden!
- Spezielle Fälle wie etwa Anlagen mit reduziertem Wochenendbetrieb und der Gefahr von kalt einblasenden Lüftungsanlagen werden – möglichst moderat – auf Spitzenlasten ausgelegt.
- Bei Speicher-Warmwasserbereitern mit internem oder externem Wärmeübertrager wird der Wärmeleistungsbedarf zur Warmwasserbereitung als höchster vorkommender Mittelwert berücksichtigt, und nicht als Spitzenwert. Die Anlagen werden grossteils mit Warmwasservorrangschaltungen (Boilervorrang) betrieben.
- Bei Durchflusswassererwärmern (Frischwasserstationen) ohne Bereitschaftsspeicher wird der Wärmeleistungsbedarf zur Warmwasserbereitung als Spitzenwert berücksichtigt. Bei Anlagen mit Bereitschaftsspeicher kann der Wärmeleistungsbedarf auch als höchster vorkommender Mittelwert berücksichtigt werden. Dabei müssen das Volumen des Bereitschaftsspeichers und die Frage, ob der Betrieb der Anlagen mit Warmwasservorrangschaltungen (Boilervorrang) erfolgt oder nicht, berücksichtigt werden.
- Für die einzelnen Wärmeabnehmerinnen und -abnehmer werden Sicherheitsfaktoren und Spitzenlastzuschläge berücksichtigt und müssen plausibel begründet werden. Jedes Objekt wird also möglichst realistisch in die Gesamtrechnung eingesetzt, sodass in der Regel keine Gleichzeitigkeitsfaktoren benötigt werden. Moderate Gleichzeitigkeitsfaktoren sind aber nicht «verboten» (siehe Kapitel 12.2.5). Durch die getroffenen Annahmen bei den Wärmekundinnen und -kunden auf der einen Seite und Sicherheitszuschläge bei anderen wird es immer einen gewissen Ausgleich geben.
- Die Darstellung erfolgt als Lastkennlinie der Gesamtanlage. Bei der Raumwärme wird zwischen einem witterungsabhängigen und einem nicht witterungsabhängigen Anteil unterschieden. Dieser ist unabhängig von den ebenfalls nicht witterungsabhängigen Anteilen für den Wärmeleistungsbedarf für Warmwasser und Prozesswärme sowie die Verlustleistung der Fernleitung.
- Die mittlere Verlustleistung der Fernleitung wird aufgrund der Herstellerangaben berechnet.

Ein grosser Vorteil der Methode über die Lastkennlinie ist, dass daraus mit Hilfe der Jahresdauerlinie der Aussentemperatur die Jahresdauerlinie des Wärmeleistungsbedarfs berechnet werden kann.

Lastkennlinie
Die Lastkennlinie ist die Darstellung des Wärmeleistungsbedarfs in Abhängigkeit des Tagesmittelwertes der Aussentemperatur. Für die Aussentemperatur ist dabei immer der 24-Stunden-Mittelwert einzusetzen, hingegen kann der Wärmeleistungsbedarf ein Tagesmittelwert (z. B. für Wohnbauten) oder ein Spitzenwert sein (z. B. für Bankgebäude). Die Lastkennlinie der Gesamtanlage ergibt sich aus der Stapelung mehrerer Lastkennlinien. Für die Berechnung der Jahresdauerlinie des Wärmeleistungsbedarfs wird eine gewichtete Lastkennlinie berechnet (siehe Bild 11.1 oder detaillierter auch im Manual zur Excel-Tabelle Situationserfassung [110]).

Jahresdauerlinie der Aussentemperatur
Die Jahresdauerlinie der Aussentemperatur ist die Darstellung der Summenhäufigkeit der Aussentemperatur als Anzahl der Tage pro Jahr. Aus Bild 11.2 kann beispielsweise herausgelesen werden, dass der 10-Jahres-Tagesmittelwert der Aussentemperatur in Zürich an 100 Tagen unter 4 °C lag.

Jahresdauerlinie des Wärmeleistungsbedarfs
Die Jahresdauerlinie des Wärmeleistungsbedarfs ergibt sich aus der gewichteten Lastkennlinie und der Jahresdauerlinie der Aussentemperatur. Aus Bild 11.3 kann beispielsweise herausgelesen werden, dass der Wärmeleistungsbedarf an 50 Tagen über 880 kW liegt. Der Wärmebedarf für diese 50 Tage ergibt sich aus der Fläche unter der Kurve.

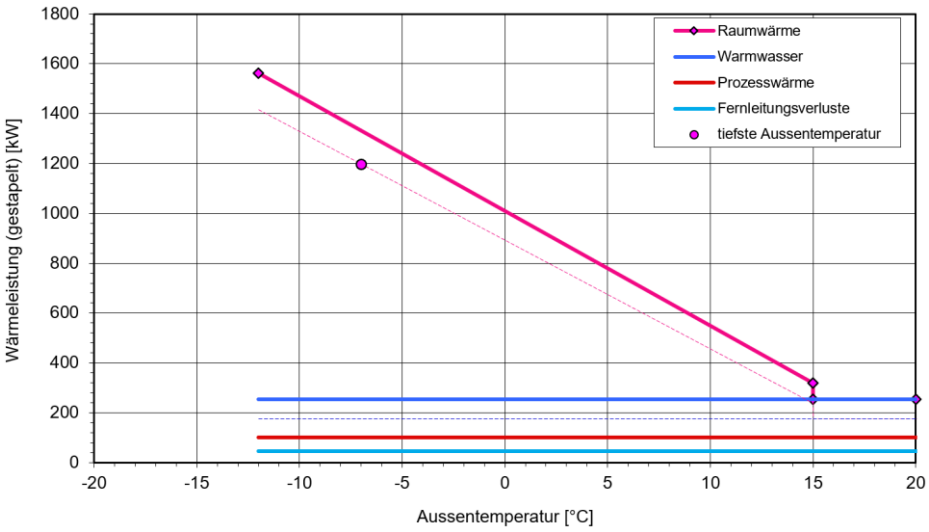


Bild 11.1 Ausgezogen die Lastkennlinie der Gesamtanlage, gestrichelt die gewichtete Lastkennlinie zur Berechnung der Jahresdauerlinie der benötigten Wärmeleistung.

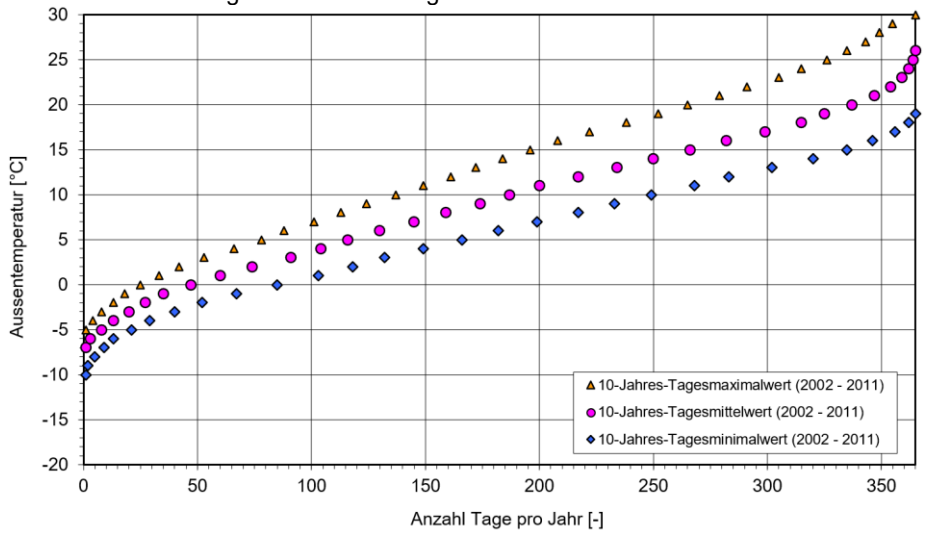


Bild 11.2 Jahresdauerlinien der Aussentemperatur für den Standort Zürich-Fluntern (10-Jahres-Mittelwert 2002-2011).

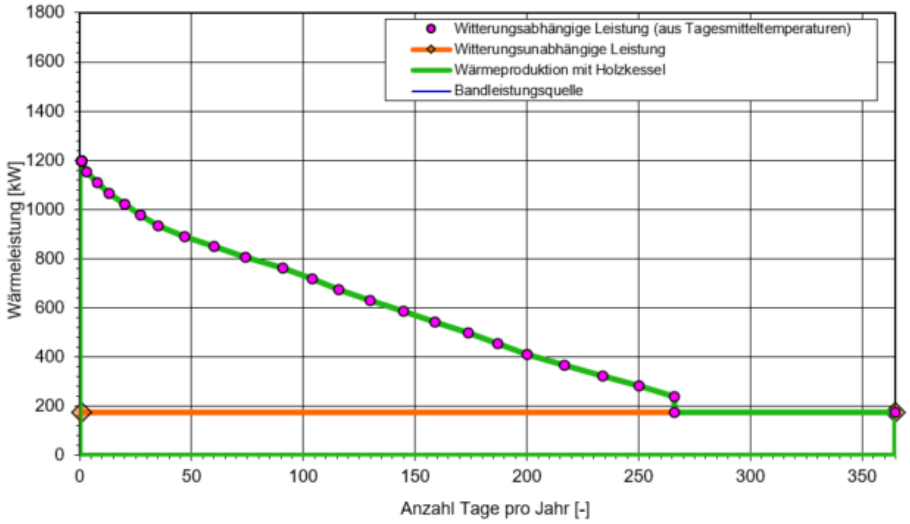


Bild 11.3 Jahresdauerlinie der benötigten Wärmeleistung, grün umrahmt die mit Holz produzierte Jahresenergiemenge.

11.4 Analyse von Wärmequellen

Neben Holz werden zunehmend auch andere erneuerbare Wärmequellen eingesetzt, um zukünftig eine vollständig erneuerbare und CO_2-neutrale Wärmeversorgung zu erreichen (siehe Kapitel 1.3.2). Holzheizwerke mit Wärmenetzen sind ein idealer Ausgangspunkt, um regional verfügbare Wärmequellen nutzbar zu machen.

Dementsprechend muss in einer frühen Planungsphase neben der Analyse des Wärmebedarfs und der Holzversorgungsstrategie (siehe Kapitel 11.2 und 12.2.1) auch die Situation der (lokal) zur Verfügung stehenden Wärmequellen analysiert werden. Im Fokus steht dabei die CO_2-Neutralität, die Verfügbarkeit und die Wirtschaftlichkeit bei der Erschliessung der Wärmequelle.

Hilfreich ist bei der Analyse auch eine bestehende Energiestrategie (z. B. Energierichtplan), wo festgelegt ist, welche Energiequellen für Gebäude, Quartiere oder grössere Versorgungsgebiete einzusetzen sind.

Vorzugsweise werden ortsgebundene Energiequellen zuerst genutzt. Erst in einem weiteren Schritt sind möglichst lokal vorkommende, ortsungebundene Energiequellen in Betracht zu ziehen. Ortsgebundene Energiequellen zeichnen sich dadurch aus, dass sie nicht einfach transportiert werden können, aber in der Regel im Überfluss zur Verfügung stehen, wie beispielsweise Fluss- und Seewasser oder industrielle Abwärme. Ortsungebundene Energiequellen dagegen lassen sich einfach transportieren und speichern, stehen aber nicht zu jeder Zeit und überall zur Verfügung (z. B. Holz und Sonnenenergie).

Bereits bei der Erstanalyse verfügbarer Wärmequellen müssen die situativen Gegebenheiten, das verfügbare Potenzial in Bezug auf Leistung und Energiemenge sowie die jeweiligen speziellen Charakteristiken der Wärmequelle wie zeitliche Verfügbarkeit/Lastprofil, Regelbarkeit oder Temperaturniveau miterhoben werden.

Auf der Grundlage dieser Daten können eine Priorisierung und Vorauswahl von Energieträgern/Wärmequellen getroffen werden, die in die weiterführende Systemwahl der Wärmeerzeugung einfliessen (siehe Kapitel 13).

11.5 Einbindung in Projektablauf von QM Holzheizwerke

Wie in Kapitel 2 beschrieben, ist bei einer Qualitätsbegleitung nach QM Holzheizwerke vorgesehen, dass im Projektablauf eine Plausibilitätskontrolle für jeden Wärmeabnehmer und für die Gesamtanlage mit der **Excel-Tabelle Situationserfassung** [110] gemacht wird. Dabei wird die Berechnung von Kennzahlen und Kennlinien gefordert. Die Kennzahlen und Kennlinien sind dann durch den Q-Beauftragten oder die Q-Beauftragte mit Angaben aus der Literatur und eigenen Erfahrungswerten zu vergleichen.

Die Situationserfassung im Allgemeinen und die Anwendung der Excel-Tabelle Situationserfassung ist ein iterativer Prozess. Im Projektablauf von QM Holzheizwerke wird spätestens bei Meilenstein 2 auf Stufe Entwurfsplanung eine Situationserfassung gefordert. Diese wird bei Meilenstein 3, wenn das Ausschreibungsprojekt steht, aktualisiert und bei Meilenstein 5 nach der Betriebsoptimierung wiederholt. Bei Meilenstein 4, anlässlich der Abnahme, sollten die Situationserfassung wenigstens überprüft und die Anlagedokumentation nachgetragen werden.

Mit jedem Meilenstein wird der Informationsstand zwar grösser, die Freiheitsgrade nehmen jedoch entsprechend ab. Während bei Meilenstein 2 eine Änderung oft nur einen Bleistiftstrich bedeutet, ist bei den Meilensteinen 4 und 5 die Anlage gebaut und eine Fehleinschätzung kommt entsprechend teuer zu stehen.

Tabelle 11.3 gibt eine Übersicht über den Stand der Situationserfassung bei den einzelnen Meilensteinen und kann als Checkliste verwendet werden. Die Spalte «Wärmeerzeugung» ist zwar erst Gegenstand der nachfolgenden Systemwahl (siehe Kapitel 13), wird aber der Übersichtlichkeit halber bereits hier behandelt.

Tabelle 11.3 Übersicht und Checkliste über den Stand der Situationserfassung bei den einzelnen Meilensteinen.

Meilenstein	Wärmeabnehmer/innen	Wärmenetz	Wärmeerzeugung allgemein	Wärmeerzeugung mit Holz
2 Entwurfsplanung	☐ Eine Liste der potenziellen Wärmeabnehmer/innen liegt vor, wobei mindestens 70 % davon eine Absichtserklärung unterschrieben haben sollten. ☐ Bei den Neubauten liegen die Planungsdaten über Wärme-, Wärmeleistungs- und Temperaturbedarf vor (je nach Projektfortschritt mit unterschiedlichem Genauigkeitsgrad). ☐ Von den bestehenden Bauten liegen die bisherigen Brennstoffverbrauchszahlen vor.	☐ Ein Situationsplan mit dem Standort der Heizzentrale und den eingezeichneten Stamm-, Zweigleitungen und Hausanschlüssen liegt vor. ☐ Das Fernleitungsnetz ist bezüglich Nennweiten grössenordnungsmässig ausgelegt (noch keine genaue Rohrnetz-/Druckabfallberechnung). ☐ Die Wärmeverteilverluste sind grössenordnungsmässig aufgrund der Anschlussdichte bestimmt worden.	☐ Der notwendige Wärme-, Wärmeleistungs- und Temperaturbedarf ist bekannt (siehe Spalte «Wärmeabnehmer/innen»). ☐ Die nationalen, regionalen oder kommunalen Energierichtpläne und -strategien wurden konsultiert. ☐ Die zur Auswahl stehenden Wärmequellen wurden hinsichtlich Charakteristik, Verfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit analysiert. ☐ Die Systemwahl (Energiemix, Art und Anzahl der Wärmeerzeugungssysteme) ist erfolgt. ☐ Die Leistungsaufteilung auf die Wärmeerzeugungssysteme wurde vorgenommen. ☐ Die Betriebsweise im Sommer und im Winter ist festgelegt.	☐ Der notwendige Wärme-, Wärmeleistungs- und Temperaturbedarf ist bekannt (siehe Spalte «Wärmeabnehmer/innen»). ☐ Das Brennstoffsortiment und dessen Verfügbarkeit sind geklärt. ☐ Die Systemwahl (Feuerungsart, monovalent/bivalent, Anzahl Kessel) ist erfolgt. ☐ Die Leistungsaufteilung auf die Kessel wurde vorgenommen. ☐ Die Betriebsweise im Sommer und im Winter ist festgelegt.
3 Ausschreibungsprojekt	☐ Die Liste der Wärmeabnehmer/innen für die erste Ausbaustufe und den Endausbau steht fest. ☐ Bei Baubeginn müssen mindestens 60 % des Jahreswärmebedarfs[1)] durch unterzeichnete Wärmelieferverträge gesichert sein. ☐ Bei den Neubauten liegen die neuesten Planungsdaten über Wärme-, Wärmeleistungs- und Temperaturbedarf vor. ☐ Bei den bestehenden Bauten sind die bisherigen Brennstoffverbrauchszahlen überprüft worden, und der Temperaturbedarf liegt zuverlässig vor (wenn möglich basierend auf Messungen).	☐ Der Standort der Heizzentrale und der Verlauf der Stamm-, Zweigleitungen und Hausanschlüsse sind definitiv festgelegt. ☐ Das Fernleitungsnetz ist bezüglich Nennweiten und Druckabfall definitiv ausgelegt. ☐ Die Wärmeverteilverluste sind aufgrund der definitiven Netzauslegung berechnet worden.	☐ Die Wärmequelle steht definitiv fest, und es liegen eine entsprechende Konzession, ein Brennstoffliefervertrag oder ein äquivalentes Dokument vor. ☐ Die Wärmeerzeugung ist festgelegt, oder es liegt eine Beschreibung mit Prinzipschema, Funktionsbeschreibung, Messkonzept usw. vor. ☐ Das definitive Prinzipschema mit eingetragenen Leistungen, Temperaturen und Durchflüssen liegt vor.	☐ Das Brennstoffsortiment steht definitiv fest, und es liegt ein entsprechender Brennstoffliefervertrag vor. ☐ Die Standardschaltung ist festgelegt oder es liegt eine äquivalente Beschreibung mit Prinzipschema, Funktionsbeschreibung, Messkonzept usw. vor. ☐ Das definitive Prinzipschema mit eingetragenen Leistungen, Temperaturen und Durchflüssen liegt vor.
4 Abnahme	☐ Die Liste der Wärmeabnehmer/innen ist auf den aktuellen Stand gebracht worden.	☐ Änderungen aufgrund der Ausführungsplanung sind in der Anlagedokumentation aktualisiert worden.	☐ Änderungen aufgrund der Ausführungsplanung sind in der Anlagedokumentation aktualisiert worden.	☐ Änderungen aufgrund der Ausführungsplanung sind in der Anlagedokumentation aktualisiert worden.
5 Betriebsoptimierung	☐ Die Betriebsoptimierung ist abgeschlossen. ☐ Die Liste der tatsächlich im ersten Betriebsjahr angeschlossenen Wärmeabnehmer/innen ist erstellt. ☐ Der tatsächliche Wärmeverbrauch, die notwendige Spitzenleistung und der Temperaturbedarf der Wärmeabnehmer/innen gemäss Liste sind bekannt. ☐ Ein Vergleich der tatsächlich verbleibenden Ausbaureserve und der noch anschlusswilligen Wärmeabnehmer/innen ist erfolgt. ☐ Falls notwendig, ist ein Konzept für die Werbung zusätzlicher Wärmeabnehmer/innen erstellt worden.	☐ Die Betriebsoptimierung ist abgeschlossen. ☐ Im Zuge der Betriebsoptimierung durchgeführte Änderungen sind in der Anlagedokumentation aktualisiert worden. ☐ Die tatsächlichen Wärmeverluste der Fernleitung des ersten Betriebsjahres sind bekannt.	☐ Die Betriebsoptimierung ist abgeschlossen. ☐ Im Zuge der Betriebsoptimierung durchgeführte Änderungen sind in der Anlagedokumentation aktualisiert worden. ☐ Die tatsächliche Auslastung der Wärmeerzeugungsanlagen ist bekannt (Vollbetriebsstundenzahlen).	☐ Die Betriebsoptimierung ist abgeschlossen. ☐ Im Zuge der Betriebsoptimierung durchgeführte Änderungen sind in der Anlagedokumentation aktualisiert worden. ☐ Die tatsächliche Auslastung der Kessel ist bekannt (Vollbetriebsstundenzahlen).

[1)] QM Holzheizwerke bezieht den Wert auf den jährlichen Wärmeabsatz der ersten Bauetappe beziehungsweise der ersten fünf Betriebsjahre. Externe Anforderungen (z. B. Förderstellen) können von diesem Wert abweichen und sollten frühzeitig geklärt werden.

12 Auslegung der Wärmeverteilung

12.1 Einleitung

In den Kapiteln 2 und 11 wurden der Projektablauf bei einer Qualitätsbegleitung mit QM Holzheizwerke und die Situationserfassung im Allgemeinen ausführlich erläutert. Kapitel 12 gibt einen Überblick über allgemeine Anforderungen bei der Auslegung der Wärmeverteilung sowie über die wichtigsten Kennzahlen und Begriffe. Für die ausführliche Behandlung der Thematik wird auf das Planungshandbuch Fernwärme [19] verwiesen.

Wie in Bild 8.1 dargestellt besteht ein Wärmenetz aus einer oder mehreren Heizzentralen, einer oder mehreren Stammleitungen, einer oder mehreren Zweigleitungen und den Hausanschlussleitungen. Da ein Wärmenetz ein kostenintensives Infrastrukturprojekt mit langer Lebens- und Nutzungsdauer ist, sind nachträgliche Änderungen schwer umsetzbar und mit hohen Kosten verbunden – das Gleiche gilt für die Mängelbehebung, wie zum Beispiel bei Leckage oder Rohrbruch. Aufgrund der langen Lebensdauer ist zwischen einer vorsorglichen Ausbaureserve mit erhöhten Investitionskosten und Wärmeverlusten und einer knappen Dimensionierung der Leitungen sorgfältig abzuwägen. Diese schwierige Aufgabe ist situativ und mit strategischem Weitblick anzugehen. Bei Kapazitätsengpässen gibt es Optimierungsmöglichkeiten wie Lastmanagement, dezentrale Wärmespeicher, Absenkung der Rücklauftemperatur, Einbindung dezentraler Wärmeerzeuger oder Ringschluss. Bei einem überdimensionierten Wärmenetz bestehen dagegen kaum Optimierungsmöglichkeiten, ausser mehr Wärme zu verkaufen.

Die Auslegung der Wärmeverteilung beziehungsweise des Wärmenetzes ist ein iterativer und spartenübergreifender Prozess und muss ganzheitlich als System mit Situationserfassung, Systemwahl und etappenweisem Netzausbau betrachtet werden.

Die nachfolgenden Ausführungen und Kennzahlen betrachten die dritte Generation der Wärmeverteilung mit Warmwassertemperaturen < 110 °C, erdverlegten und festverbundenen vorisolierten Kunststoffmantelrohren und kompakten indirekten Übergabestationen (siehe [19], Seite 65 ff.). Im abschliessenden Kapitel 12.5 wird auf die Weiterentwicklung der Wärmenetztechnologie eingegangen, die sich durch niedrigere Temperaturniveaus auszeichnet und durch Integration diverser Systeme an Komplexität zunimmt.

12.2 Kennzahlen und Begriffe

12.2.1 Potenzielles Versorgungsgebiet

Die nachfolgend beschriebenen Tools und Methoden für die Erfassung potenzieller Versorgungsgebiete dienen als Hilfsmittel für die Erstevaluierung und grobe Abschätzung in einer Machbarkeitsstudie (siehe auch Kapitel 11). Für einen Investitionsentscheid ist zwingend eine Detailplanung erforderlich.

Neben der konventionellen Abschätzung potenzieller Versorgungsgebiete bieten sich vermehrt digitale Informationsquellen wie GIS-Tools, Katasterpläne oder Ähnliches an, welche den Wärme- und Kältebedarf sowie weitere nützliche Informationen anbieten. Dazu gehören zum Beispiel folgende kostenlose webbasierte Software-Angebote (siehe auch Bild 12.1):

- THERMOS [114] dient zur Planung und Optimierung von Fernwärmenetzen entsprechend den benutzer- und projektspezifischen Anforderungen wie Budget, Klima- und Energieziele. Mit THERMOS sind sofortige Kartierungen und integrierte Energiebedarfsschätzungen möglich.
- Hotmaps-Toolbox [115] und PETA 5.1 [113] unterstützen Behörden, Energiedienstleistungsunternehmen und Planerinnen/Planer bei der strategischen Wärme- und Kälteplanung auf lokaler, regionaler und nationaler Ebene. Die beiden Tools enthalten Daten zur Abschätzung des Heiz- und Kühlbedarfs in europäischen Regionen (Hotmaps inkl. Schweiz und Norwegen).
- Von map.geo.admin.ch [116] gibt es ein ähnliches Angebot wie die Hotmaps-Toolbox für die Schweiz. Es enthält Daten zur Abschätzung des Heiz- und Kühlbedarfs. Weiter sind darin über 1’000 bestehende thermische Netze abgebildet.

Für eine Abschätzung der Wärmebezugsdichte in einem Wärmeversorgungsgebiet kann der Jahreswärmebedarf für Raumwärme, Warmwasser und Prozesswärme der einzelnen Gebäude auch grob abgeschätzt werden. Dazu dienen folgende Methoden, welche im Planungshandbuch Fernwärme [19] im Kapitel 6.4.2 detaillierter beschrieben sind:

- Abschätzung des Jahreswärmebedarfs via Energiebezugsfläche EBF und Gebäudequalität.
- Abschätzung des Jahreswärmebedarfs via Gebäudevolumen und Gebäudequalität.

Bei Prozesswärme sind die Bedarfswerte vertieft abzuklären, zudem stehen hierzu selten spezifische Kennwerte zur Verfügung.

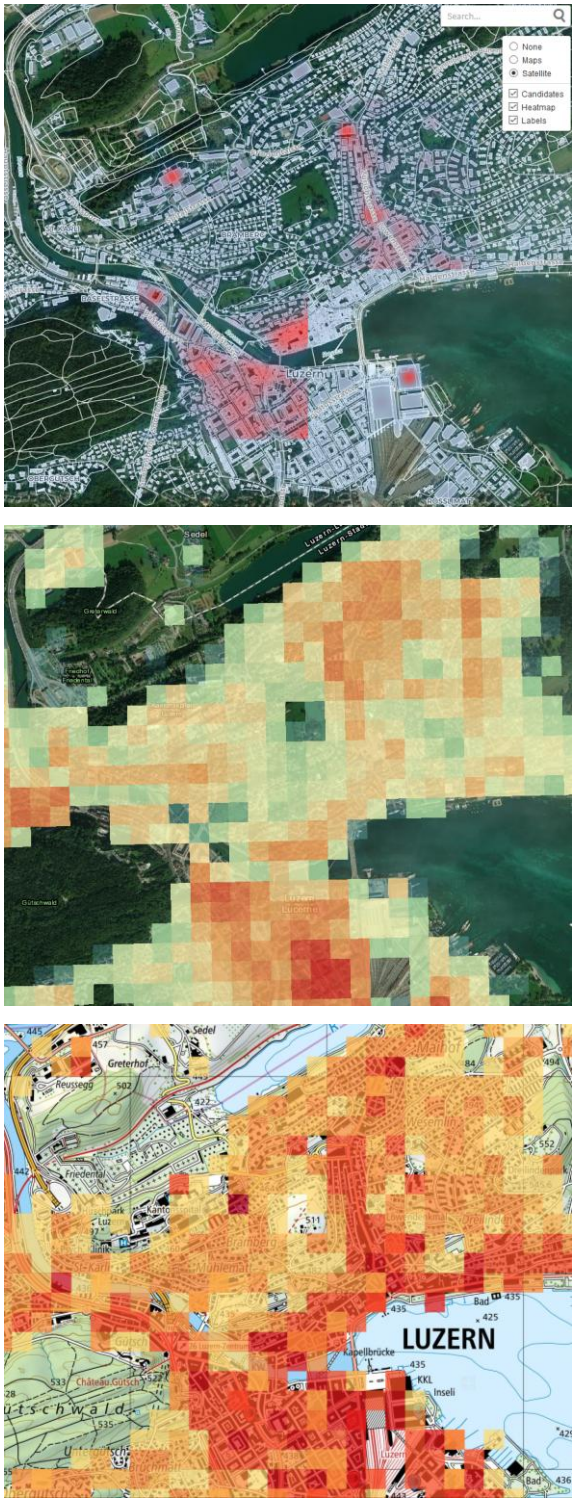


Bild 12.1 Kartenausschnitt (Printscreens) aus THERMOS (oben), Hotmaps-Toolbox (Mitte) und map.geo.admin.ch (unten) für die Stadt Luzern (CH). Die farbigen Felder stellen unterschiedliche Wärme- und Kältebedarfswerte dar.

12.2.2 Wärmebezugsdichte

Die Wärmebezugsdichte (auch Wärmedichte oder Wärmebedarfsdichte genannt) ist ein Eignungskriterium eines Versorgungsgebietes für den Anschluss an einen Wärmeverbund. Sie setzt den jährlichen Wärmebezug aller Gebäude eines Gebietes ins Verhältnis zur Grundfläche des Gebietes. Es wird empfohlen, zur Beurteilung von Wärmebezugsdichten die Tabelle 12.1 zu verwenden.

Tabelle 12.1 Empfohlene Wärmebezugsdichte einer Zone als Eignungskriterium.

Eignung für Wärmeverbund	Wärmebezugsdichte kWh/(a m^2)
Nicht geeignet	< 50
Bedingt geeignet	50 - 70
Geeignet	> 70

Aussagen der Wärmebezugsdichte

- Reine Einfamilienhaus-Gebiete sind in der Regel nicht interessant (Wärmebezugsdichte 15 - 30 kWh/(a m^2)).
- Interessant sind Gebiete mit verdichteter Bauweise wie zum Beispiel Mehrfamilienhaus-Quartiere, Dorf- oder Stadtkerne.
- Die Wärmebezugsdichte und die Wirtschaftlichkeit eines Wärmenetzes können verbessert werden, wenn vorrangig die im Gebiet liegenden Grossabnehmer (Schlüsselkundinnen und -kunden) eingebunden werden.
- Ein Wärmenetz für einen einzelnen Grossabnehmer ist in der Regel nur dann interessant, wenn auch die umliegenden Gebiete eine hohe Wärmebezugsdichte aufweisen.
- Ein Wärmenetz kann auch nur für wenige Grossabnehmer errichtet werden, sofern sich bei entsprechender örtlicher Nähe eine geeignete Wärmebezugsdichte ergibt.
- Bei geringen Investitions- und Brennstoffkosten oder geringen Wärmeverlusten (hoher Dämmstandard, niedrige Versorgungstemperaturen) können Gebiete mit einer tieferen Wärmebezugsdichte als 70 kWh/(a m^2) wirtschaftlich mit Fernwärme versorgt werden.

12.2.3 Schlüsselkundinnen/-kunden

Neben der Wärmebezugsdichte als Mass für die Eignung eines Gebietes sind Objekte mit grosser Wärmeabnahme, auch als Schlüsselkundinnen und -kunden bezeichnet, wesentlich für einen wirtschaftlichen Betrieb eines Fernwärmenetzes.

Eine frühzeitige Umfrage bei Schlüsselkundinnen und -kunden soll das Anschlussinteresse klären und Planungsdaten zur Verfügung stellen. Oft liegen bei bestehenden Gebäuden oder besonderen Bauten, insbesondere bei Industrie mit Prozesswärme, keine geeigneten

Daten vor oder ihre Erhebung ist aufwendig. In der Vorstudie sollte der Aufwand dafür zwar geringgehalten werden, aber es sollte trotzdem mit mündlichen Anfragen und qualifizierten Abschätzungen gearbeitet werden.

12.2.4 Erschliessungsgrad

In einem potenziellen Versorgungsgebiet werden selten alle Gebäude angeschlossen. Insbesondere bei Neuentwicklungen von grösseren Versorgungsgebieten, zum Beispiel in einer Machbarkeits- oder Vorstudie, ist der Jahreswärmebedarf in einem Gebiet mit dem sogenannten Erschliessungsgrad, oder auch Anschlussgrad, zu berücksichtigen. Der Erschliessungsgrad ist situativ zu betrachten und kann zwischen 50 % und 80 % betragen.

12.2.5 Gleichzeitigkeitsfaktor

Zur Dimensionierung des Wärmeverteilnetzes muss zusätzlich ein Gleichzeitigkeitsfaktor berücksichtigt werden. Dieser beschreibt im Verbund mit vielen Wärmeabnehmern den Effekt, dass praktisch zu keinem Zeitpunkt alle Wärmeverbraucher gleichzeitig die maximale Leistung beziehen, und berechnet sich aus dem maximal gleichzeitig anfallenden Wärmeleistungsbedarf im Verhältnis zum gesamten abonnierten Wärmeleistungsbedarf.

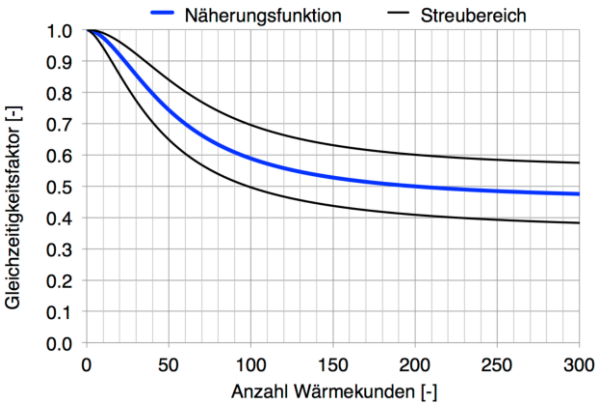


Bild 12.2 Funktion und Streubereich für den Verlauf des Gleichzeitigkeitsfaktors in Abhängigkeit der Anzahl der Wärmekundinnen/-kunden (siehe [19]).

In Bild 12.2 ist der Gleichzeitigkeitsfaktor als **Näherungsfunktion** in Abhängigkeit der Anzahl Wärmekundinnen und -kunden dargestellt. Demnach ist bei 10 bis 20 Wärmeabnehmern mit einer Gleichzeitigkeit von etwa 95 % im Streubereich von 85 % bis 100 % zu rechnen. Bei Verbunden mit über 100 Wärmeabnehmern kann von einer Gleichzeitigkeit von ungefähr 60 % ausgegangen werden.

Entscheidend für die Festlegung der Gleichzeitigkeit ist die **Abnehmerstruktur**. So führen permanente Prozesswärmeabnehmer zu einer höheren Gleichzeitigkeit als zum Beispiel eine Einfamilienhaussiedlung. Eine temporäre oder saisonale Wärmeabnahme reduziert die Gleichzeitigkeit, wohingegen saisonale Spitzenlasten zu erhöhten Gleichzeitigkeitsfaktoren führen, zum Beispiel während der Ferienzeit in Wintersportorten mit maximaler Belegung von Hotels und Ferienwohnungen. Die Abschätzung der Gleichzeitigkeit beruht auf einer fundierten Kenntnis der Abnehmerstruktur und viel Erfahrung.

Bei der Anwendung der **Excel-Tabelle Situationserfassung** von QM Holzheizwerke ist zu beachten, dass grundsätzlich kein Gleichzeitigkeitsfaktor verwendet wird, da die Auslegung des Wärmeerzeugers auf einen Leistungsbedarf im Tagesmittel ausgelegt ist, womit der beschriebene Effekt ähnlich zum Gleichzeitigkeitsfaktor bereits berücksichtigt wird.

12.2.6 Anschlussdichte

Bei Fernwärmenetzen wird von einem wirtschaftlichen Betrieb ausgegangen, wenn der Erlös des Wärmeverkaufs die Wärmegestehungskosten aus Kapital- und Betriebskosten übersteigt. Ein wichtiger Indikator zur Abschätzung der Wirtschaftlichkeit ist die Anschlussdichte (auch Liniendichte genannt). Die Anschlussdichte ist das Verhältnis zwischen der jährlich abgesetzten Wärmemenge in MWh/a und der gesamten Trassenlänge von Haupt-, Zweig- und Hausanschlussleitungen in Metern. Ähnlich wie bei der Wärmebezugsdichte kann auch die Anschlussdichte für einzelne Teilnetze oder Netzstränge berechnet und zur Beurteilung genutzt werden.

Für eine Grobbeurteilung ohne genauere Kenntnis der Randbedingungen gelten Versorgungsgebiete mit einer Anschlussdichte > 2 MWh/(a*m) im Endausbau und bei Ganzjahresbetrieb in der Regel als attraktiv. Rahmenbedingungen wie Ertrag aus Wärmeverkauf, günstige Brennstoffkosten, geringe Wärmeverluste (hoher Dämmstandard, niedrige Netztemperaturen) oder vorteilhafte Baubedingungen sowie Investitionshilfen ermöglichen auch mit geringeren Anschlussdichten einen wirtschaftlichen Betrieb.

Der Anschluss von Kleinverbrauchern in der Nähe oder entlang einer Trasse ist grundsätzlich erwünscht und normalerweise unkritisch in Bezug auf die Anschlussdichte. Befindet sich jedoch ein Kleinverbraucher weit entfernt von der nächsten Haupt- oder Zweigleitung, so reduziert er die Anschlussdichte, weshalb ein entsprechender Anschluss unattraktiv sein kann und situativ geprüft werden muss. Der Anschluss kann allenfalls an eine Beteiligung an den zusätzlich anfallenden Anschlusskosten oder einen erhöhten Wärmepreis gebunden werden.

Detailliertere Ausführungen werden im Planungshandbuch Fernwärme [19] in Kapitel 6.4.4 beschrieben.

12.2.7 Spezifische Investitionskosten

Die spezifischen Kosten der Wärmeverteilung weisen einen grossen Streubereich auf und werden hauptsächlich durch Baubedingungen, Rohrtyp, lokales Preisniveau, Erschliessungsfortschritt und Anschlussdichte bestimmt.

Im ländlichen Raum sind die Kosten für das Verlegen von Fernwärmerohren in der Regel tiefer als im städtischen Raum. Im Stadtgebiet verhindern bestehende Werkleitungen, Baukörper, die Beschaffenheit des Un-

tergrunds, hohe Wiederherstellungskosten (Asphaltierung, Pflasterung usw.) sowie schwierige Verkehrsverhältnisse eine optimale Leitungsführung, was zum Teil erhebliche Mehrkosten verursacht.

Kann der Zielwert der spezifischen Investitionskosten bei einer Qualitätsbegleitung nach QM Holzheizwerke nicht erreicht werden, können in Absprache mit der Investorin oder dem Investor und den Kapitalgebern höhere Werte vereinbart werden. Dabei ist zu prüfen, wie sich die höheren spezifischen Investitionskosten der Wärmeverteilung langfristig auf die Wirtschaftlichkeit auswirken, vor allem im Hinblick auf mögliche Preissteigerungen, zum Beispiel durch höhere Brennstoffpreise. In beiden Fällen sollte die Wirtschaftlichkeit mit einem Businessplan und einer Planbilanz und Planerfolgsrechnung nachgewiesen werden. Detailliertere Ausführungen werden in Kapitel 10 Wirtschaftlichkeit beschrieben.

12.2.8 Wärmeverteilverluste

Die Wärmeverteilverluste sind wie die Anschlussdichte eine wichtige Kenngrösse, welche die Wirtschaftlichkeit beeinflusst. Sie sind von folgenden Faktoren abhängig:

- Dimensionierung der Rohrleitungen
- Leistungsfähigkeit der Rohrleitungsdämmungen (U-Wert)
- Temperaturniveau von Vor- und Rücklauf
- Temperaturprofil während des Betriebs (konstant, gleitend oder konstant-gleitend)
- Anschlussdichte
- Betriebsdauer (Ganzjahres- oder Saisonbetrieb).

Im Betrieb werden die Wärmeverteilverluste als Differenz zwischen der von der Wärmeerzeugung dem Wärmenetz zugeführten Wärmemenge und der von allen Wärmeabnehmern bezogenen Wärmemenge bestimmt (siehe Planungshandbuch Fernwärme [19] Kapitel 7.1.4). Die Wärmeverteilverluste können absolut oder relativ, in der Regel bezogen auf die eingespeiste Wärmemenge, betrachtet werden. Bei der relativen Betrachtung liegen die Wärmeverluste im Sommer wesentlich höher als im Winter, wohingegen bei der absoluten Betrachtung der Unterschied nahezu vernachlässigbar ist.

Bild 12.3 zeigt die relativen (prozentualen) jährlichen Wärmeverteilverluste in Funktion der Anschlussdichte für verschiedene Betriebsweisen und Vorlauftemperaturen. Aus Effizienzgründen sollten nach QM Holzheizwerke die Wärmeverteilverluste einen Zielwert von 10 % des Nutzwärmebedarfs der Wärmeabnehmer nicht übersteigen. Um den Zielwert nach Bild 12.3 einzuhalten, sind je nach Betriebsweise, Temperaturniveau und Investitionskosten unterschiedliche Anschlussdichten zu erreichen.

Bei einem in Betrieb stehenden Wärmenetz können die relativen Wärmeverteilverluste in erster Priorität über eine Erhöhung der Anschlussdichte (Verdichtung) verringert werden, womit die Wirtschaftlichkeit insgesamt verbessert wird.

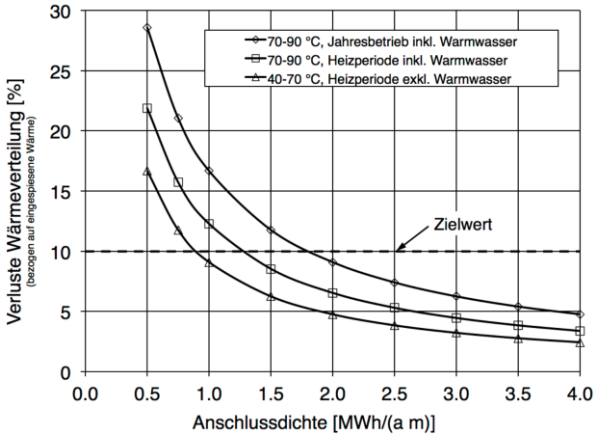


Bild 12.3 Wärmeverteilverluste in Funktion der Anschlussdichte für verschiedene Betriebsweisen und Vorlauftemperatur-Niveaus des Wärmenetzes.

12.2.9 Abweichung von Effizienzkriterien

Wie bereits in Kapitel 12.2.6 beschrieben, ermöglichen kostengünstige Bau- und Betriebsbedingungen einen wirtschaftlichen Betrieb eines Wärmenetzes auch mit tieferen Anschlussdichten.

Bei der Betrachtung von nicht vermeidbarer Abwärme (z. B. Prozesse und Industrie) ergeben sich ebenfalls Zielkonflikte hinsichtlich Effizienz (geringe Wärmeverteilverluste) und Wirtschaftlichkeit (geringe Investitionen). Da die Abwärmequellen vielfach nicht in unmittelbarer Nähe der Wärmekunden liegen, wäre es sinnvoll, wenn für die Abwärmenutzung auch tiefere Anschlussdichten zulässig sind, indem beispielsweise für die Verbindungs- oder Transportleitung höhere Wärmeverluste akzeptiert werden.

Auf diese Fragestellung kann an dieser Stelle keine abschliessende Antwort oder Empfehlung abgegeben werden. Grundsätzlich sollte es jedoch unter gewissen Umständen möglich sein, geringere Effizienzanforderungen zuzulassen, solange die Nutzung auf einem ressourcenschonenden Einsatz sowie mehrheitlich auf CO_2-neutralen Energieträgern basiert. Die Beurteilung sollte daher immer situativ erfolgen und auf die jeweiligen Rahmenbedingungen seitens Gesetzgeber, Akzeptanz in der Bevölkerung und anderes mehr abgestimmt werden.

12.3 Projektablauf

Ein Wärmenetz umfasst die Wärmeerzeugung, die Wärmeverteilung und die Wärmeübergabe an die Kundinnen und Kunden. Die nachfolgende Beschreibung des Projektablaufs umfasst die Planungsaufgaben für die Wärmeverteilung ab Wärmeerzeugung bis und mit Wärmeabgabe bei den Wärmekundinnen und -kunden und ist im Planungshandbuch Fernwärme [19] in Kapitel 6 ausführlich beschrieben. Es wird grundsätzlich zwischen einer Planungsphase und einer Betriebsphase unterschieden.

In Tabelle 12.2 sind diese Planungsphasen und die entsprechenden Tätigkeiten und Aufgaben aufgelistet. Auf die Dimensionierung der Rohrdurchmesser wird im nächsten Kapitel eingegangen.

Tabelle 12.2 Planungsphasen und Tätigkeiten gemäss Planungshandbuch Fernwärme (siehe [19], Seite 103 ff.).

Planungsphase	Tätigkeit / Aufgabe
Vorstudie	Potenzielles Wärmeversorgungsgebiet bestimmen
	Schlüsselkundschaft bestimmen
	Wärmeversorgungsgebiet aktualisieren
	Erste Wirtschaftlichkeitsbetrachtung
	Entscheidung zur Weiterentwicklung
Entwurfsplanung	Konkretisieren der Schlüsselkundinnen/-kunden
	Umfrage Kleinwärmekundinnen/-kunden
	Festlegen Wärmeversorgungsgebiet
	Zweite Wirtschaftlichkeitsbetrachtung
	Entscheidung zur Umsetzung
Ausschreibungs-planung	Auslegung Wärmenetz
	Spezifikation Übergabestationen
	Baubewilligung erstellen
	Ausschreibung und Submission
	Dritte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung
	Vergabe, Ausführung und Abnahme

12.4 Dimensionierung der Rohrdurchmesser

Die Dimensionierung der Rohrdurchmesser erfolgt grundsätzlich auf Basis des spezifischen Druckverlustes pro Meter Leitungslänge in Pa/m. Bild 12.4 zeigt die Empfehlungen für die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten nach ÖKL-Merkblatt 67 [101] und nach der Swedish District Heating Association DHA [77]. Als Vergleich sind die Strömungsgeschwindigkeiten eingezeichnet, die einem konstanten spezifischen Druckverlust von 100, 200 und 300 Pa/m entsprechen [121].

Resultate Praxiserhebung

Eine Praxiserhebung an 52 Fernwärmenetzen hat gezeigt, dass rund 80 % der Haupt- und Teilstränge grösser ausgeführt wurden, als effektiv erforderlich gewesen wäre [122]. Die Überdimensionierung entspricht meist einem oder zwei, vereinzelt jedoch bis zu vier Nenndurchmessern und sie verursacht im Vergleich zu einem Wärmenetz mit kleinstmöglichem Rohrdurchmesser deutlich höhere Wärmeverluste und Kosten.

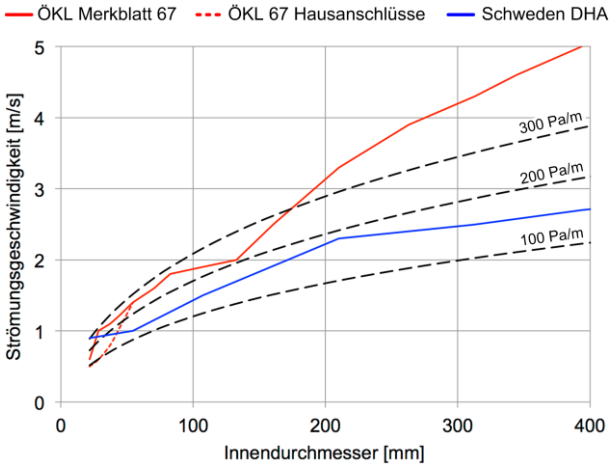


Bild 12.4 Strömungsgeschwindigkeiten in Funktion des Rohrinnendurchmessers mit Empfehlungen für maximale Fliessgeschwindigkeit nach ÖKL-Merkblatt 67 [101] und der Swedish District Heating Association (DHA) [77].
Zudem sind die Strömungsgeschwindigkeiten bei konstanten spezifischen Druckverlusten von 100, 200 und 300 Pa/m dargestellt [121].

12.4.1 Empfehlungen zur Dimensionierung

Die Dimensionierung der Rohrdurchmesser basiert auf dem geplanten oder zu erwartenden Endausbau. Aufgrund der langen Lebensdauer ist eine langfristige strategische Betrachtung unabdingbar, aber auch mit entsprechenden Unsicherheiten und Schwierigkeiten verbunden. Es ist zwischen einer vorsorglichen Ausbaureserve mit erhöhten Investitionskosten und Wärmeverlusten und einer prinzipiell knappen Dimensionierung der Leitungen sorgfältig abzuwägen.

Zusätzlich zu berücksichtigen sind die geeignete Wahl des Rohrsystems und der Dämmstandards, die Druckstufe, die Verlegesituationen und Verlegeverfahren sowie die Datenübertragung und Leckageüberwachung. Hinzu kommen rohrstatische und betriebliche Temperaturvorgaben wie Dauerbetriebstemperatur im Winterfall und zu erwartende Rücklauftemperatur.

Basierend auf den oben aufgeführten Randbedingungen erfolgt die Dimensionierung der Rohrdurchmesser nach folgenden **Empfehlungen**:

- Hydraulische Rohrrauigkeit k ≤ 0.01 mm
- Auslegung einzelner Teilstränge auf einen spezifischen Druckabfall von 250 Pa/m bis 300 Pa/m
- Kontrollgrösse für längere Strangabschnitte mit unterschiedlichen Nennweiten (z. B. Schlechtpunkt) mit mittlerem spezifischem Druckabfall von 150 Pa/m bis 200 Pa/m

Für eine erste Abschätzung und Dimensionierung sind für unterschiedliche Rohrsysteme (Kunststoffmantelrohr KMR, KMR-Duo, Metallmediumrohr MMR, MMR-Duo, Kunststoffmediumrohr PMR und PMR-Duo) im Planungshandbuch Fernwärme die Übertragungsleistungen

bei unterschiedlichen Temperaturspreizungen und spezifischen Druckverlusten grafisch dargestellt (siehe [19], Seite 191 ff.).

12.4.2 Vorgehen bei der Dimensionierung

Das Vorgehen zur Dimensionierung des Wärmenetzes ist in Kapitel 7.3 im Planungshandbuch Fernwärme detailliert beschrieben (siehe [19], Seite 130 ff. und Auslegungstabellen Seite 191 ff.).

Als Ausgangslage dient ein Leitungsplan oder ein Leitungsschema, in welchem die Leitungen in Teilstrecken aufgeteilt werden. Eine Teilstrecke ist definiert als eine Leitung ohne Abzweigung und Nennweitenänderung. Für die Auslegung müssen für die Teilstrecken folgende Angaben definiert und Grössen bekannt sein:

- Nummerierung der Teilstrecke
- Wärmeleistung der Teilstrecke
- Durchfluss der Teilstrecke
- Länge der Teilstrecke
- Einzelwiderstände der Teilstrecke (Berücksichtigung von Richtungsänderungen und Einbauten)
- Erste Leitungsdimensionierung der Teilstrecke.

Wichtig: Die Bestimmung des optimalen Nenndurchmessers ist ein iterativer Prozess.

12.4.3 Berechnungsmethoden

Die Berechnung des Druckverlustes und die daraus resultierende Dimensionierung der Rohrleitung können auf unterschiedliche Arten erfolgen.

Einerseits von Hand mit Hilfe von Tabellen, Tafeln und Formularen zur Rohrnetzberechnung, andererseits anhand von speziellen Berechnungsprogrammen.

Es gibt dazu eine Vielzahl an Rohrnetz-Berechnungsprogrammen (z. B. aus der Haus- und Installationstechnik). Teilweise dienen sie alleine zur Berechnung der Druckverluste, wie beispielsweise das Excel-Tool Druckverlust der Hochschule Luzern – Technik & Architektur [123].

Es gibt speziell für die Fernwärme-Anwendung auch umfangreichere Berechnungsprogramme, die für die Berechnung grosser Wärmenetze geeignet sind. Diese verfügen oft über umfassende Schnittstellen zum Import und Export von Daten (z. B. GIS-Daten) und decken alle fernwärmerelevanten Aspekte der Berechnung wie Druckverlust, Wärmeverlust, Schlechtpunkt, Dimensionierung, Optimierung, Netzanalyse und andere mehr ab. Es gibt eine Vielzahl an kommerziell verfügbaren Berechnungsprogrammen wie beispielsweise:

- STANET des Ingenieurbüros Fischer-Uhrig [124]
- ROKA GS des Rechenzentrums für Versorgungsnetze Wehr GmbH [125]
- SIR-3S von 3S-Consult GmbH [126]
- THENA von Verenum AG [107]

Die meisten Programme verfügen über voreingestellte Werte (z. B. für Rohrrauigkeiten), die jedoch nicht ohne genaue Prüfung verwendet werden sollten. Alle relevanten Berechnungsparameter sind in der Regel frei konfigurierbar und sollten jedenfalls genau geprüft und eingestellt werden.

12.5 Entwicklungen in der Wärmenetztechnologie

Klassische Fernwärmenetze übertragen Wärme von der Quelle (Wärmeerzeuger) mit Vorlauftemperaturen von > 60 °C und teilweise bis > 150 °C zur Senke (Wärmebezügerinnen/-bezüger) [77] und werden nach Bild 12.5 auch als «Hochtemperaturnetze» bezeichnet. Sie dienen der Versorgung von Gebäuden mit Raumwärme und Warmwasser sowie von Prozessen.

Niedertemperaturnetze bezeichnen Netze zum Austausch von Wärme, die bei Temperaturen unter 60 °C betrieben werden. Damit kann eine Direktversorgung für Raumwärme bis zu einem unteren Limit von rund 30 °C erfolgen. Für die Warmwasseraufbereitung werden dezentrale Wärmepumpen benötigt. Bei Vorlauftemperaturen unter 30 °C (siehe Bild 12.5) sind sowohl für Raumwärme als auch Warmwasserbereitung dezentrale Wärmepumpen erforderlich. Niedertemperaturnetze können auch als Quelle für dezentrale Wärmepumpen-Heizzentralen verwendet werden, die nachgeschaltete konventionelle Hochtemperatur-Verteilnetze versorgen.

Bei Temperaturen unter 20 °C kann das Netz auch als Wärmesenke und somit zur Versorgung mit Kälte dienen. Im letzten Fall wird die Anwendung auch als Fernkälte bezeichnet. Anwendungen zur Wärmeverteilung unter 30 °C werden zum Teil auch als «kalte Fernwärme» oder «Anergienetz» bezeichnet. Da «Anergienetz» physikalisch unpräzise ist, wird dieser Begriff im vorliegenden Dokument nicht verwendet.

Thermische Netze dienen als Oberbegriff für Netze zur Übertragung von Wärme auf allen Temperaturniveaus (siehe Bild 12.5). Sie werden wie oben beschrieben anhand der **Vorlauftemperatur** unterschieden. Daneben existieren auch verschiedene **Betriebsarten** in Bezug auf die Fliessrichtung des Wassers (gerichtet oder ungerichtet) und den Energiefluss im System (unidirektional oder bidirektional; siehe dazu [127]).

Der Trend in der Entwicklung der Fernwärmetechnologie, speziell auch bei bestehenden Hochtemperaturnetzen, geht in Richtung niedriger Systemtemperaturen, um eine verlustarme und effiziente Wärmeverteilung zu ermöglichen, die Effizienz und den Ertrag von erneuerbaren Wärmequellen zu erhöhen und neue Niedertemperatur-Wärmequellen zu erschliessen. Welche Systemtemperaturen und Netztechnologie gewählt werden, hängt jedoch sehr stark von den verfügbaren Wärmequellen und den Rahmenbedingungen des jeweiligen Projektes ab. Dementsprechend sind Niedertemperaturnetze nicht immer besser geeignet als Hochtemperaturnetze.

Typische fossile Wärmequellen zur Fernwärmeversorgung (fossile WKK-Anlagen, Gaskessel) werden mittelfristig nicht mehr als Wärmequelle zur Verfügung stehen. Andere Hochtemperatur-Wärmequellen der Fernwärme wie WKK-Abwärme aus der Kehricht- beziehungsweise Müllverbrennung und Holzheiz- und Heizkraftwerke werden zukünftig verstärkt durch andere erneuerbare **Energieträger** und andere Abwärmequellen ergänzt:

- Umweltwärme als Wärmequelle für zentrale und dezentrale Wärmepumpen zum Heizen oder als Wärmesenke für passive Kühlung von Gebäuden (Free Cooling) mit Nutzung von:
  - Oberflächenwasser (Seen und Flüsse)
  - Grundwasser (verschiedene Tiefen)
  - Erdwärme (vor allem Erdwärmesonden).
- Von verschiedenen Energieträgern stammende Abwärme, darunter von kalorischen Kraftwerken, von fossil oder elektrisch betriebenen industriellen Prozessen sowie Abwärme von Kälteanlagen, Gebäuden und Abwasser und je nach Region auch von Geothermiekraftwerken
- Fossile Energieträger (für Spitzenlast und Redundanz, künftig begrenzt)

Daneben stehen auch Umgebungsluft und Solarstrahlung als Wärmequellen zur Verfügung. Für Wärmepumpen sind andere Wärmequellen als Luft (zum Beispiel Seewasser oder Erdwärme) für die erforderlichen Temperaturen und Leistungen effizienter. Solarthermie wird je nach Region und Rahmenbedingungen in unterschiedlichen Ausprägungen bereits genutzt und wird weiter zunehmen.

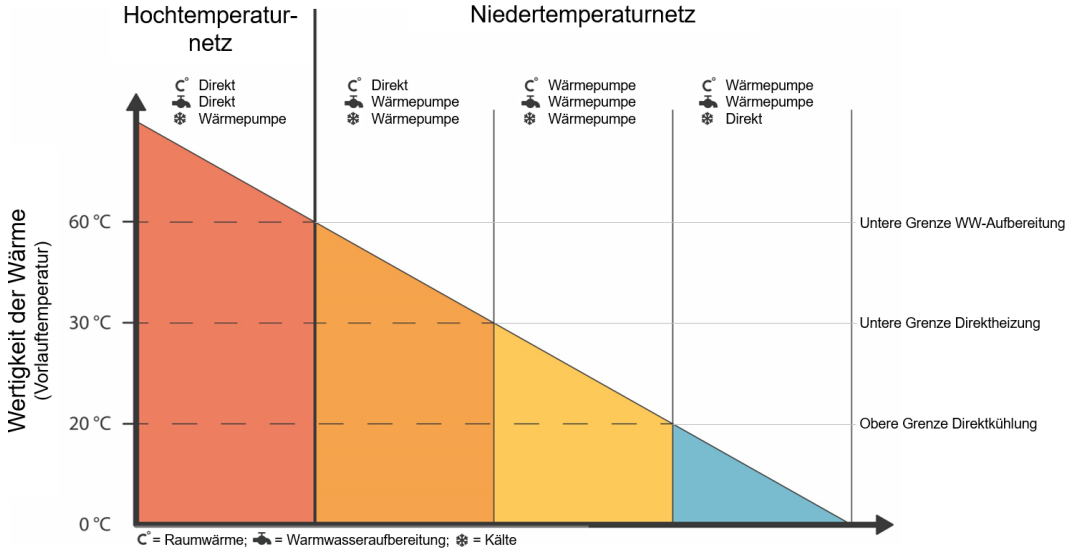


Bild 12.5 Einteilung thermischer Netze in Funktion der Vorlauftemperatur (nach [127] mit Ergänzungen).

Holzenergie als nachwachsender Rohstoff wird aufgrund seiner regionalen Verfügbarkeit, der Speicherbarkeit und Flexibilität weiterhin eine wichtige und tragende Rolle in der zukünftigen Wärmeversorgung spielen (siehe Kapitel 1.3.2). Spezielle Vorteile durch niedrige Wärmenetztemperaturen ergeben sich für Holzheizwerke durch die reduzierten Übertragungsverluste und insbesondere in Kombination mit einer Abgaskondensation, wo bei niedrigen Versorgungstemperaturen signifikant höhere Erträge erzielt werden können (siehe Kapitel 13).

Holzheizwerke können auf unterschiedlichste Weise in Niedertemperaturkonzepte integriert werden. Beispielsweise kann durch eine Wärmeauskoppelung aus dem Rücklauf für Niedertemperatur-Subnetze eine kaskadische Wärmenutzung erfolgen. Umgekehrt kann eine Niedertemperatur-Wärmequelle über eine Niedertemperatur-Transportleitung und eine zentrale Wärmepumpe in einen Wärmeverbund integriert werden.

Es gibt viele aktuelle und geplante Projekte zur Weiterentwicklung von Konzepten und Technologien im Bereich thermischer Netze. Teilweise handelt es sich um Pilot- und Demonstrationsanlagen, bei denen die Technologie- und Marktreife nicht immer gegeben sind beziehungsweise manche Konzepte sehr spezifisch und für spezielle Anwendungen entwickelt wurden. Ziel von QM Holzheizwerke und des vorliegenden Planungshandbuchs ist ein effizienter, ressourcenschonender und emissionsarmer Betrieb von Holzheizwerken und thermischen Netzen. In Anlehnung daran können folgende allgemeinen Grundsätze für thermische Netze und das Zusammenspiel unterschiedlicher erneuerbarer Wärmequellen formuliert werden:

- Bestmögliche und ressourcenschonende Nutzung aller regional verfügbaren Wärmequellen
- Ortsgebundene Quellen vor ortsungebundenen Quellen nutzen
- Anlagenkonfiguration und Dimensionierung der einzelnen Wärmeerzeuger und Wärmespeicher müssen so erfolgen, dass alle Wärmequellen innerhalb optimaler und zulässiger Betriebsbedingungen (Leistung, Temperatur) betrieben werden.
- Minimierung der Wärmeverluste im Wärmenetz

Sobald Holzheizwerke Teil eines Gesamtsystems sind, sollten die Grundsätze und Empfehlungen dieses Planungshandbuches für einen effizienten und emissionsarmen Betrieb von Holzkesseln sinngemäss beziehungsweise soweit möglich angewendet werden (siehe Kapitel 13.7). Darüber hinaus lassen sich aus dem aktuellen Wissensstand keine allgemeingültigen Empfehlungen ableiten, welche Konzepte zukunftsfähig sind und welche nicht. Es ist davon auszugehen, dass sich bei der Vielzahl an Konzepten nicht alle langfristig durchsetzen werden.

Zur Analyse der aktuellen Situation wurden im Programm «Thermische Netze» von EnergieSchweiz rund 1’000 Netze erfasst [116]. Ausser zwei klassischen Fernwärmenetzen werden in der Analyse auch sieben Fallbeispiele von thermischen Netzen mit Vorlauftemperaturen unter 40 °C beschrieben [128], die als Fallbeispiele dienen können. Das Handbuch «Low-Temperature District Heating Implementation Guidebook» der Internationalen Energieagentur (IEA) [129] bietet weiterführende Literatur zum Thema Niedertemperaturnetze und eine Vielzahl an Demonstrationsbeispielen.

13 Systemwahl Wärmeerzeugung

13.1 Einleitung

Nachdem aus der Situationserfassung und der Auslegung der Wärmeverteilung wichtige Basisdaten wie Jahreswärmeproduktion und Gesamt-Wärmeleistungsbedarf bekannt sind, befasst sich das Kapitel 13 mit der Auslegung der Wärmeerzeugung. Je nach Gesamt-Wärmeleistungsbedarf und der gewünschten Aufteilung des Leistungsbedarfs auf die Wärmeerzeuger wird eine Grundvariante der Wärmeerzeugungssysteme ausgewählt. Dabei soll auch der Einbezug anderer erneuerbarer Wärmequellen und erneuerbarer Wärmeerzeugersysteme, der Einsatz effizienzsteigernder Massnahmen und die Möglichkeiten der Wärme-Kraft-Kopplung (WKK) geprüft werden. Die Auswahl der Wärmeerzeuger beeinflusst wiederum die Auslegung der Heizzentrale, der Hydraulik und der Kaminanlage. Zudem muss die Einhaltung der gesetzlichen Sicherheits-, Lärmschutz- und Emissionsanforderungen gewährleistet werden.

13.2 Ökologischer Vergleich mit anderen Wärmeerzeugern

13.2.1 Übersicht

Bei der Wahl eines Heizsystems stehen neben den Kosten heute auch immer die Umweltverträglichkeit beziehungsweise die Nachhaltigkeit im Vordergrund. Obwohl eine präzise und allgemeingültige Beurteilung der Umweltverträglichkeit nicht möglich ist, stehen verschiedene Parameter und Methoden zur Verfügung, die im Rahmen einer Anlagenplanung für einen qualitativen Vergleich verschiedener Varianten eingesetzt werden können.

Sofern lediglich der lokale Einfluss zum Beispiel auf den Lärm oder die Umgebungsluft beurteilt werden soll, können entsprechende Erhebungen zum Betrieb der Anlage erfolgen. Im Falle der Luftqualität bietet sich dazu ein Vergleich der Emissionen verschiedener Heizsysteme an. Emissionsfaktoren zu einzelnen Anlagetypen werden von den Umweltbehörden erhoben, regelmässig aktualisiert und beispielsweise in der Schweiz durch das Bundesamt für Umwelt im «Faktenblatt Emissionsfaktoren Feuerungen» zur Verfügung gestellt [130].

Für eine weitergehende Beurteilung müssen allerdings die Wirkungen der vor- und nachgelagerten Prozesse wie Bau der Anlage, Beschaffung des Brennstoffs, Hilfsenergieverbrauch und Entsorgung über den Gesamtprozess und die erwartete Lebensdauer der Anlage berücksichtigt werden. Eine umfassende Bewertung erfolgt dabei anhand einer Lebenszyklusanalyse (auch Umweltbilanz, Ökobilanz oder Life cycle assessment LCA).

Besonders wichtig zur Beurteilung von Energieanlagen sind die Energieeffizienz und die Klimaschädlichkeit, die wie folgt quantifiziert werden können:

- **Beurteilung der Energieeffizienz** (meist bezogen auf die Primärenergie):
  Kumulierter Energieaufwand (meist angegeben als Primärenergiefaktor) und optional daraus abgeleitet die energetische Rückzahldauer sowie der Energie-Erntefaktor
- **Beurteilung der Klimaschädlichkeit:**
  Bestimmung der Gesamtemissionen an Treibhausgasen (CO_2- oder THG-Äquivalent)

Obwohl die Erhebung dieser Daten eine Bilanzierung über den Lebenszyklus voraussetzt, beschreiben die ermittelten Daten eine einzige physikalische Einheit, die ohne subjektive Gewichtung unterschiedlicher Effekte quantifiziert werden kann.

Wenn eine umfassende Bewertung verschiedener Umweltwirkungen verlangt wird, können einzelne Umweltbereiche separat bewertet werden (z. B. «kritische Volumina» in Form von Kennzahlen für kritische Luftmenge, kritische Wassermenge, Abfallmenge und Energieäquivalent). In Deutschland kommt dazu unter anderem die vom Umweltbundesamt (UBA) entwickelte Bewertungsmethode der «UBA Wirkungsindikatoren» zur Anwendung. Diese hat eine Rangbildung verschiedener Umweltwirkungen zum Ziel, was eine subjektive Bewertung einzelner Wirkungen verlangt.

Bei anderen Methoden werden die Umweltwirkungen in einem einzigen Indikator zusammengefasst. Die Aggregierung verschiedener Parameter zu einem einzigen Indikator erfolgt zum Beispiel nach der in der Schweiz angewendeten «Methode der ökologischen Knappheit» zu sogenannten «Umweltbelastungspunkten» (UBP), wozu ebenfalls eine subjektive Gewichtung einzelner Umweltwirkungen erforderlich ist. In der Schweiz kommt die Bestimmung der UBP zur Beurteilung der Nachhaltigkeit im Bauwesen zum Einsatz. Entsprechende Daten werden in einer Empfehlung der Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren (KBOB) zur Verfügung gestellt. Diese weist Daten zum Primärenergiefaktor, den Treibhausgasemissionen und der Umweltbelastung aus [131].

Der nachfolgende Kasten beschreibt die Eigenheiten der erwähnten Methoden.

Beurteilung der Energieeffizienz

Kumulierter Energieaufwand (KEA)

Der KEA umfasst den Energieaufwand für Herstellung, Nutzung und Entsorgung einer Anlage oder eines Produktes [132]. In der Regel wird dabei die Primärenergie bewertet und der KEA dann auch als «**Primärenergiefaktor**» bezeichnet. Aus dem KEA und der jährlichen Energieproduktion kann die energetische Rückzahldauer bestimmt werden.

Erntefaktor EF = KEP/KEA

Wenn für das System zusätzlich eine zu erwartende Lebensdauer angenommen wird, kann aus dem KEA und der während der Lebensdauer kumulierten Energieproduktion (KEP) zudem der energetische Erntefaktor (EF) bestimmt werden. Nach dieser Definition ist EF < 1, und der Wert kann zum Beispiel zum Vergleich von zwei Systemen zur Nutzung von Energieholz eingesetzt werden. Für einen Vergleich einer Ölheizung mit einer Holzheizung ist diese Definition dagegen nicht sinnvoll. Dazu kann ein Erntefaktor unter der Voraussetzung bestimmt werden, dass nichterneuerbare Primärenergie als Aufwand gezählt wird, während erneuerbare Primärenergie nicht bewertet wird.

Mit Index EE für erneuerbare Energie gilt:

$\mathbf{EF_{EE}} = KEP/KEA_{EE}$

Mit Index NE für nichterneuerbare Energie gilt:

$\mathbf{EF_{NE}} = KEP/KEA_{NE}$

In der Regel gilt damit für fossile Energieträger: $EF_{NE} = EF < 1$ und für erneuerbare Energien: $EF_{NE} > 1 > EF$.

Diese Methode ermöglicht einen Vergleich der Ressourceneffizienz verschiedener Energiesysteme, wobei für erneuerbare Energieträger $EF_{NE} > 2$ bis > 10 möglich ist, während für nichterneuerbare Energieträger $EF_{NE} < 1$ gilt.

Für KEA gilt zudem: $\mathbf{KEA_{EE} + KEA_{NE}} = KEA$

Beurteilung der Klimaschädlichkeit

THG-Äquivalent

Wasserdampf, CO_2, Methan (CH_4) und zahlreiche weitere Gase sowie Partikel in der Atmosphäre beeinflussen den Strahlungshaushalt der Erde, was als Treibhauseffekt beschrieben wird. Als Mass für eine Veränderung der Treibhauswirkung dient das CO_2-Äquivalent beziehungsweise THG-Äquivalent. Dieses beschreibt den Beitrag einer Verbindung zum Treibhauseffekt im Vergleich zu CO_2 über einen bestimmten Zeitraum. Als Zeitraum dient meist eine Dauer von 100 Jahren. Für 100 Jahre weist zum Beispiel 1 kg Methan (CH_4) ein CO_2-Äquivalent von 28 kg CO_2 auf. Für Distickstoffmonoxid («Lachgas», N_2O) beträgt dieser Wert 265. Wenn alle treibhausrelevanten Emissionen eines Prozesses über den Lebenszyklus aufsummiert werden, kann damit das THG-Äquivalent bestimmt werden. Für fossile Brennstoffe wird das THG-Äquivalent in der Regel durch CO_2 dominiert. Bei anderen Prozessen können auch CH_4 (z. B. bei Biogas) oder N_2O (z. B. beim Anbau von Pflanzen) wichtig sein.

Ökobilanz mit Bewertung verschiedener Umweltauswirkungen in verschiedenen Wirkungskategorien

Beispiele sind die CML-Methode mit 14 Kategorien oder die Eco-Indikator-Methode mit 9 Kategorien (Radioaktivität, Ozonabbau, Schwermetalle, Kanzerogenität, Sommersmog, Wintersmog, Pestizide, Treibhauseffekt, Versauerung und Überdüngung). Diese Methoden ermöglichen einen zusammenfassenden Vergleich zahlreicher Umweltauswirkungen. Wenn jedoch zum Beispiel Holz mit Erdöl in einer einzigen Vergleichszahl verglichen werden soll, ist eine Gewichtung des Treibhauseffekts notwendig.

Ökobilanz mit Bewertung nach der ökologischen Knappheit

Hier erfolgt die Bewertung im Verhältnis zur Zielsetzung und aktuellen Zielerreichung in einer Region oder einem Land und mittels einer Aufsummierung von Umweltbelastungspunkten (UBP). Diese Methode erlaubt eine einfache Bewertung der Sensitivität wichtiger Einflussfaktoren wie zum Beispiel der Emissionen von Holzheizsystemen. Die Gesamtbewertung orientiert sich allerdings an einer subjektiven Zieldefinition wie beispielsweise dem Über- oder Unterschreiten von nationalen Grenzwerten.

13.2.2 Beispiele

Tabelle 13.1 zeigt einen Vergleich zum Erntefaktor EF_{NE} (ohne Bewertung der eingesetzten erneuerbaren Energie) verschiedener Heizsysteme, in dem auch der Einfluss eines Fernwärmenetzes untersucht wurde. Die höchsten Werte automatischer Holzheizungen von 13.0 erreichen Anlagen ohne Fernwärmenetz. Die Vorleistungen und Verluste des Netzes führen zu etwas geringeren Erntefaktoren um 9 für typische Anschlussdichten. Bei geringen Anschlussdichten sinkt der Erntefaktor.

Tabelle 13.1 Energie-Erntefaktor EF_{NE} verschiedener Heizsysteme angegeben in TJ Nutzwärme pro TJ nichterneuerbare Primärenergie. Für Fernwärme ist zudem der Einfluss der Anschlussdichte in MWh/(a*m) dargestellt. Daten nach [132].

Versorgungskette	**EF_{NE}** [TJ/TJ]
Holzpellets	8.3
Hackschnitzel mit Fernwärme bei 0.6 MWh/(a*m)	7.9
Hackschnitzel mit Fernwärme bei 1.5 MWh/(a*m)	9.0
Hackschnitzel mit Fernwärme bei 3 MWh/(a*m)	9.4
Hackschnitzel ohne Fernwärme	13.0
Stückholzkessel	13.8
Heizölkessel mit Abgaskondensation	0.71
Erdgasheizung mit Abgaskondensation	0.74

Da Öl- und Gasheizungen einen Erntefaktor zwischen 0.71 und 0.74 erreichen, erzielen Holzheizungen eine um einen Faktor 10 bis 20 höhere Substitutionswirkung für nichterneuerbare Energieträger. Das Substitutionspotenzial ergibt sich dabei aus dem Verhältnis der Erntefaktoren von Holzheizsystemen und fossilen Heizsystemen (z. B. 14/0.7 = 20). Dies bedeutet, dass mit einem Liter Erdöl, der zum Aufbau und Betrieb von Holzheizungen investiert wird, 10 bis 20 Liter Erdöl substituiert werden, die für eine Ölheizung mit äquivalentem Nutzen erforderlich sind. Da fossile Energieträger CO_2 verursachen, ist dieser Faktor auch ein Indikator für die Substitution fossiler CO_2-Emissionen.

Bild 13.1 zeigt ein Beispiel einer Ökobilanz nach der Eco-Indikator-Methode. Da im Bild sämtliche Umwelteffekte zu einer Kennzahl zusammengefasst werden, hängt die Reihenfolge der untersuchten Varianten von der Gewichtung des Treibhauseffekts ab. Bei «hoher» Gewichtung des Treibhauseffekts werden Holzheizungen deutlich besser bewertet als fossile Heizungen, während bei «geringer» Gewichtung des Treibhauseffekts die Gasheizung am besten abschneidet, was die Problematik der aggregierten Gewichtung veranschaulicht.

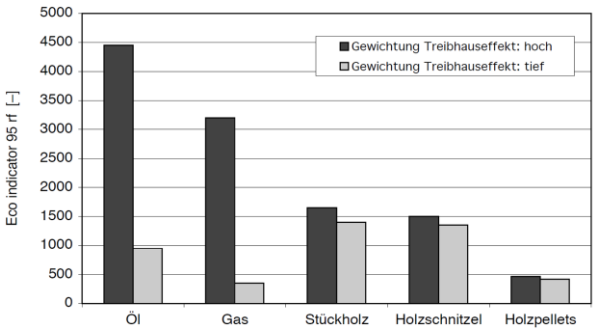


Bild 13.1 Umweltbelastung als Eco-Indikator-Punkte pro TJ Nutzenergie für Öl-, Gas- und Holzheizungen für die Gewichtungsvarianten des Treibhauseffekts «hoch» und «tief» nach Daten von [133].
Die Werte für Stückholz und Hackschnitzel sind zu über 80 % auf die Emissionen an Feinstaub und Stickoxid zurückzuführen. Für moderne Hackschnitzelheizungen mit Feinstaubabscheider würde der Wert ungefähr bei einem Drittel liegen.

Tabelle 13.2 zeigt einen Auszug der *Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren* (KBOB-Empfehlung) [131] zur Beurteilung der Nachhaltigkeit im Bauwesen in der Schweiz. Die Angaben zum Primärenergiefaktor beziehungsweise zum kumulierten Energieaufwand sind in Bild 13.2 (links) dargestellt, wobei nur die nichterneuerbare Primärenergie bewertet wird (Index NE). Die Daten zeigen, dass die Energieholzsysteme hohe Erntefaktoren erzielen und den Verbrauch an nichterneuerbaren Energien im Vergleich zu Heizöl und Erdgas um rund 80 % bis 90 % reduzieren können (Bild 13.2 rechts). Eine ähnliche Wirkung wird in Bezug auf die Treibhausgasemissionen erzielt, wie aus Bild 13.3 (links) hervorgeht.

Demgegenüber zeigt Bild 13.3 (rechts), dass die Unterschiede der Umweltbelastungspunkte geringer sind als die Unterschiede bei Betrachtung der Primärenergie oder der Treibhauswirkung. Durch die Berücksichtigung sämtlicher Umweltwirkungen wird der Vorteil von Erdgas im Vergleich zu Heizöl grösser, während die Vorteile der Holzheizsysteme gegenüber den fossilen Heizungen geringer werden.

Für die kommenden Jahrzehnte ist allerdings höchste Priorität auf die Treibhausgasemissionen zu setzen, da die wichtigste Herausforderung die Erreichung der Klimaziele ist. Wie Bild 13.3 (links) zeigt, sind in Bezug auf die Treibhausgasemissionen insbesondere Holzheizungen und Solaranlagen vorteilhaft. Daneben sind auch Wärmepumpen sinnvoll, sofern sie mit CO_2-armer Elektrizität betrieben werden. Die in Tabelle 13.2 gezeigten Daten der Wärmepumpen gelten für einen Strombezug ab Netz in der Schweiz mit 0.102 kg CO_2 pro kWh Elektrizität. Für andere Länder ist die entsprechende CO_2-Intensität des Stroms zu berücksichtigen. In Tabelle 13.2 sind die Daten für Österreich, Deutschland und Italien aufgeführt. Die Elektrizität in diesen Ländern weist eine um rund einen Faktor 2, 4 und 6 höhere CO_2-Intensität auf. Für den Faktor 2 wird der Vorteil von Wärmepumpen gegenüber fossilen Heizungen verringert, bei Faktor 4 resultieren ähnlich hohe Treibhausgasemissionen, während bei CO_2-intensivem Strom mit Faktor 6 die Wärmepumpen zu höheren CO_2-Emissionen als fossile Heizungen führen.

Tabelle 13.2 Primärenergiefaktor bzw. kumulierter Energieaufwand, Erntefaktor EF_{NE}, Treibhausgasemissionen und Umweltbelastungspunkte verschiedener Heizsysteme bezogen auf die produzierte Nutzwärme. Der Erntefaktor EF_{NE} wurde berechnet als Kehrwert von KEA_{NE}. Die Angaben zu den Wärmepumpen gelten für den Schweizer Strommix, dessen Kennwerte am Ende der Tabelle angegeben sind. Daten nach [131] ausser Daten zu Elektrizität in Österreich, Deutschland und Italien nach [134]

	Primärenergie (Öl-Äquivalent) = Kumulierter Energieaufwand KEA			Erntefaktor	Treibhaus-gasemissionen	Umweltbelas-tungspunkte
	Nichterneuerbar (KEA_{NE})	Erneuerbar (KEA_{EE})	Total (KEA)	Nichterneuerbar (EF_{NE} = 1/KEA_{NE})	THG	UBP
Heizkessel[1)]	kWh/kWh Q_n			kWh Q_n/kWh	kg CO_2/kWh Q_n	UBP/kWh Q_n
Heizöl EL	1.300	0.007	1.31	0.77	0.322	251.0
Erdgas	1.160	0.005	1.17	0.86	0.249	151.0
Stückholz	0.194	1.580	1.77	5.2	0.045	152.0
Stückholz mit Partikelfilter	0.198	1.580	1.78	5.1	0.046	144.0
Holzschnitzel	0.097	1.420	1.52	10.3	0.020	116.0
Holzschnitzel mit Partikelfilter	0.100	1.420	1.52	10.0	0.020	106.0
Pellets	0.210	1.320	1.53	4.8	0.038	108.0
Pellets mit Partikelfilter	0.213	1.320	1.53	4.7	0.038	103.0
Biogas	0.330			3.0	0.142	121.0
Wärmepumpe Luft/Wasser (JAZ 2.8)	0.908			1.1	0.063	149.0
Wärmepumpe Erdsonden (JAZ 3.9)	0.665			1.5	0.046	110.0
Flachkollektor WW EFH	0.275			3.6	0.037	102.0
Flachkollektor RW+WW EFH	0.221			4.5	0.034	90.0
Flachkollektor WW MFH	0.086			11.6	0.014	40.7
Röhrenkollektor RW+WW EFH	0.193			5.2	0.031	76.5
Fernwärme[2)]	kWh/kWh_{end}			kWh_{end}/kWh	kg CO_2/kWh_{end}	UBP/kWh_{end}
Heizzentrale Holz	0.143	1.580	1.72	6.99	0.050	120.0
Heizkraftwerk Holz	0.128	1.330	1.46	7.81	0.042	102.0
Heizzentrale WP Abwasser (JAZ 3.4)	0.894			1.1	0.041	124.0
Heizzentrale WP Grundwasser (JAZ 3.4)	0.963			1.0	0.062	155.0
Fernwärme aus Kehrichtwärme (Mittel CH)	0.452			2.2	0.089	75.5
Blockheizkraftwerk Biogas	0.207			4.8	0.079	72.9
Elektrizität vom Netz[2)]	kWh/kWh_{end}			kWh_{end}/kWh	kg CO_2/kWh_{end}	UBP/kWh_{end}
Schweiz (CH-Verbrauchermix)	2.520	0.488	3.01	0.40	0.102	347.0
Österreich[3)]	0.820	0.980	1.80	1.22	0.202[4)]	170.0
Deutschland[3)]	1.760	0.830	2.59	0.57	0.427[5)]	400.0
Italien[3)]	2.760	0.320	3.08	0.36	0.610	489.0

Abkürzungen: JAZ: Jahresarbeitszahl, Q_n: Nutzwärme, WW: Warmwasser, RW: Raumwärme, EFH: Einfamilienhaus, MFH: Mehrfamilienhaus

[1)]Für Heizkessel ist die Bezugsgrösse 1 kWh Nutzwärme.
[2)]Für Fernwärme und Elektrizität ist die Bezugsgrösse 1 kWh Endenergie (Handelseinheit).
[3)]Quelle: Treeze 2021 [134], alle anderen Daten nach KBOB 2016 [131].
[4)]Aktuelle Zahlen und anzuwendende Werte zu den CO_2-Emissionen in Österreich liefert das Umweltbundesamt https://www.umweltbundesamt.at/
[5)]Aktuelle Zahlen und anzuwendende Werte zu den CO_2-Emissionen in Deutschland liefert das Umweltbundesamt https://www.umweltbundesamt.de/

Für Heizöl, Erdgas und Holzbrennstoffe werden nach KBOB Werte für KEA ausgewiesen, die grösser als 1 und untereinander vergleichbar sind. Für Biogas und Kehricht werden KEA < 1 ausgewiesen, da deren Primärenergieanteil nicht oder nur teilweise bewertet wird. Diese Werte für KEA = KEA_{EE} + KEA_{NE} sind nicht vergleichbar mit anderen und in der Tabelle nicht aufgeführt.

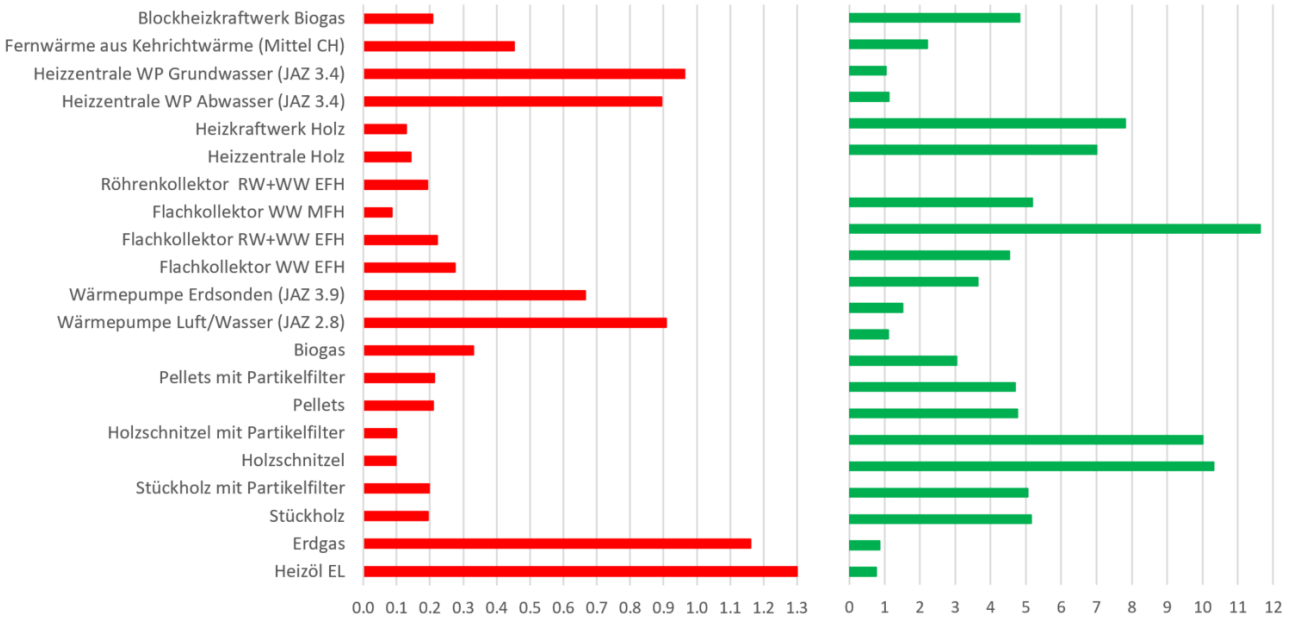


Bild 13.2 Links (rot): Primärenergiefaktor an nichterneuerbarer Energie bzw. kumulierter Energieaufwand KEA_{NE}
Rechts (grün): Erntefaktor an nichterneuerbarer Energie $EF_{NE} = 1/KEA_{NE}$ nach Tabelle 13.2

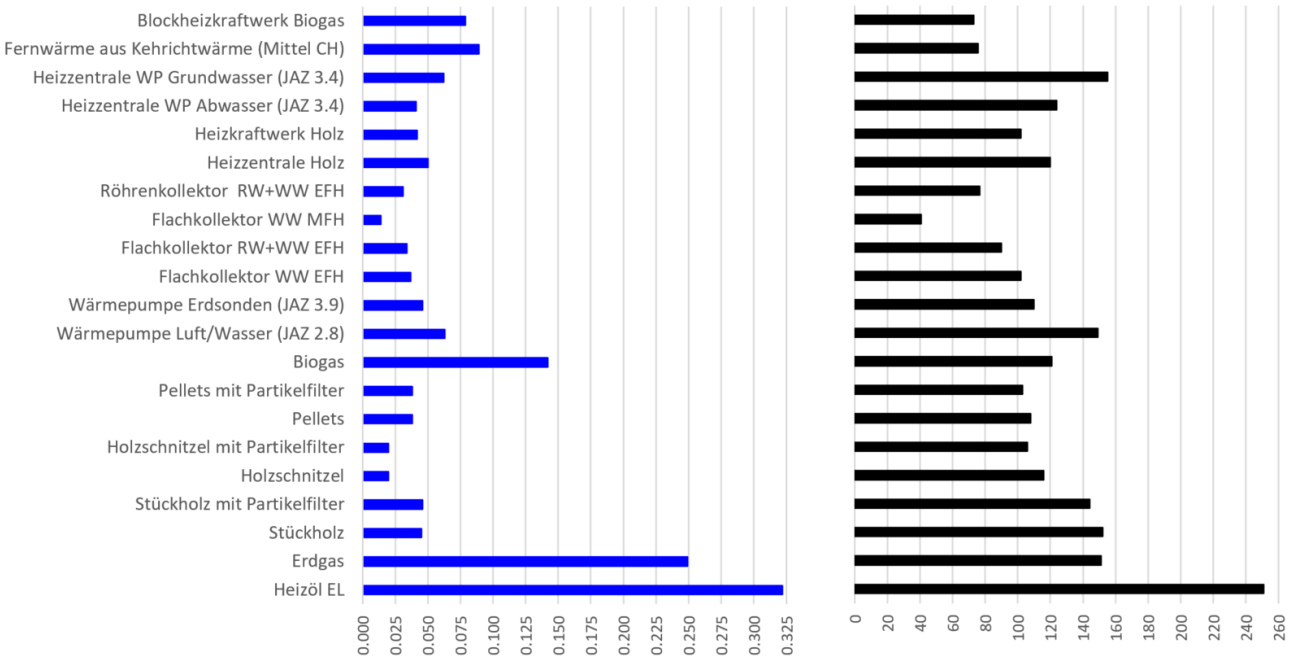


Bild 13.3 Links (blau): Treibhausgasemissionen in [kg CO_2-eq/$kWh_{Nutzwärme}$]
Rechts (schwarz): Umweltbelastungspunkte [UBP/$kWh_{Nutzwärme}$] nach Tabelle 13.2

13.3 Allgemeine Anforderungen und Definition der wichtigsten Begriffe

Holzheizwerke müssen emissionsarm und wirtschaftlich betrieben werden. Dies erfordert ein auf das Brennstoffsortiment abgestimmtes Feuerungssystem, eine korrekte Erfassung der Wärmeleistung der einzelnen Wärmeerzeuger, ein der Brennstofflogistik angepasstes Brennstofflagervolumen (Silo-Nettovolumen) und eine optimale hydraulische Einbindung ins Gesamtsystem. Durch die Konzentration auf das Wesentliche und einfache Konzepte sollen bewährte und wirtschaftliche Anlagen angestrebt werden.

Als **Zielsetzung** ist je nach Projektfortschritt (Meilenstein) in steigendem Genauigkeitsgrad Folgendes festzulegen:

1. Jährlicher Gesamtwärmebedarf[1)] respektive erforderliche Jahreswärmeproduktion der Wärmeerzeugung
2. Gesamt-Wärmeleistungsbedarf[1)]
3. Wärmeerzeugungssystem (Schaltung, Regelkonzept)
4. Feuerungssystem des Holzkessels
5. Aufteilung des Gesamt-Wärmeleistungsbedarfs auf die Wärmeerzeuger der einzelnen Energieträger (Brennstoffe) inklusive deren Wärmeproduktionsanteil[1)]
6. Dimensionierung der übrigen Komponenten in der Heizzentrale (Volumen von Brennstofflager und Wärmespeicher usw.)

[1)] gemäss Excel-Tabelle Situationserfassung

Bei der Auslegung eines Holzheizwerks müssen folgende spezifischen Eigenschaften einer Holzfeuerung besonders berücksichtigt werden:

- Lange Reaktionszeit nach Änderung der Soll-Leistungsvorgabe durch träges Abbrandverhalten des Brennstoffs in Abhängigkeit des Wassergehalts und der Verdichtung (z. B. Pellets)
- Der Holzkessel kann in der Regel im Leistungsbereich von 30 % bis 100 % bei kontinuierlicher Verbrennung mit ununterbrochener Verbrennungsluftzufuhr und kontinuierlicher Brennstoffzufuhr betrieben werden. Eine Erweiterung des unteren Leistungsbereichs bis gegen 15 % ist mit geeigneten Massnahmen (z. B. Verbrennungsluftvorwärmung) möglich.
- Minimal erforderliche mittlere Tagesheizlast bei Schwachlastbetrieb im Bereich von 10 % bis 30 % der Holzkesselnennleistung.

Die optimale Auslegung eines Holzheizwerks verlangt spezifische Fachkenntnis und stellt somit erhöhte Anforderungen an die Planerin und den Planer. Personen oder Planungsbüros, die zum ersten Mal ein Holzheizwerk projektieren und planen, wird empfohlen, erfahrene Fachplanerinnen oder -planer beratend beizuziehen. Damit die Qualitätsziele von QM Holzheizwerke erreicht werden, muss die Wärmeerzeugungsanlage folgende Anforderungen und Zielwerte erfüllen:

- **Niedrige Emissionen**: Die gesetzlich geltenden Grenzwerte dürfen während der stationären Betriebsphase einer Holzfeuerungsanlage nicht überschritten werden. Dies gilt für alle Brennstoffsortimente sowie im ganzen Leistungsbereich der Feuerung und erfordert deshalb geeignete Regelkonzepte.
- **Geruchsimmissionen** während der instationären Betriebsphasen im Schwachlastbetrieb bei Startphase, Ausbrandphase und Glutbettunterhalt sind mit den in Kapitel 13.5 beschriebenen Massnahmen zu vermeiden (Hinweis Tabelle 13.4).
- **Hoher Jahresnutzungsgrad η_a > 85 %:** Voraussetzungen für einen hohen Jahresnutzungsgrad (siehe Kapitel 20.12) sind:
  - Luftüberschuss im gesamten Leistungsbereich (30 % bis 100 %) mit $\lambda < 1.7$
  - Abgastemperaturen im Mittel < 140 °C und geringe Strahlungsverluste des Kessels
  - Monovalente Holzfeuerungsanlage: Minimale Anzahl Vollbetriebsstunden nach Ausbauetappe 1 pro Jahr > 1'400 h und bei Vollausbau pro Jahr > 2'000 h
  - Bivalente Holzfeuerungsanlage: Die Vollbetriebsstunden liegen gemäss Tabelle 13.5 wesentlich höher (in AT Zielwert laut ÖKL-Richtlinie > 4'000 h/a)
  - Wenig Bereitschaftsbetrieb (Standbybetrieb) respektive Glutbettunterhalt (Verhältnis von jährlicher Bereitschaftsdauer zu Einschaltdauer < 0,2)
  - Möglichst geringe Anzahl von Anfahr- und Ausbrandphasen
  - Einhaltung der Schwachlastbedingungen gemäss Tabelle 13.4.
- **Niedrige Anlageinvestitionskosten**: Keine Überdimensionierung der Wärmeerzeugungsanlage, einfache Heizzentrale mit übersichtlichem Anlageaufbau und möglichst wenig Kesseleinheiten mit möglichst breitem Leistungsbereich. Mehrkesselanlagen mit Standard-Seriengeräten bilden dabei eine Ausnahme.
- **Niedrige Wartungs- und Unterhaltskosten**: Verwenden von automatischer Entaschung und Kesselrohrreinigung, Sicherstellen von störungsarmem Betrieb durch Einsatz von Anlagenkomponenten mit langer Lebensdauer, dem vereinbarten Brennstoffsortiment angepasstes Beschickungs- und Feuerungssystem und regelmässiger Service. Gleichmässige Auslastung des Holzkessels mit geringer Anzahl von Start- und Ausbrandphasen (Holzkessel folgt kontinuierlich dem mittleren Lastverlauf ohne kurzfristige starke Leistungsänderungen).
- **Kostengünstige Brennstofflagerung**
  - Das Volumen des Brennstofflagers für **Holzhackschnitzel** mit automatischem Austragungssystem (Silo-Nettovolumen) soll bei direkter Versorgungskette (siehe Kapitel 4.5.5) fünf bis sieben Tagesbedarfe der Holzkesselanlage bei Nennleistungsbetrieb à 24 h zuzüglich des Transportvolumens des Lieferfahrzeugs fassen. Diese Dimensionierung ermöglicht dem Brennstoffversor-

gungsunternehmen ein Logistikintervall, um Feiertage wie Weihnachten und Neujahr oder kurzfristige Unterbrüche in der Lieferkette problemlos überbrücken zu können. Bei der indirekten Versorgungskette (siehe Kapitel 4.5.5) kann das erforderliche Brennstofflagervolumen in Absprache mit dem Brennstofflieferanten reduziert werden. Die Versorgungssicherheit unter Extrembedingungen wie Schneefall, Eisregen und Ähnliches ist mit dem Brennstofflieferanten abzustimmen.

- Das Brennstofflagervolumen für **Pellets** soll etwa zehn Tagesbedarfe bei Auslegetemperatur plus im Minimum eine Anlieferungskapazität des Pelletfahrzeuges von 25 bis 30 m^3 Pellets aufweisen. Damit kann die Reaktionszeit des Brennstofflieferanten von Bestellung bis Lieferung mit dem erforderlichen Logistikspielraum mitberücksichtigt werden. Weitere Hinweise sind im Kapitel 14.2 zu finden.

- **Optimale Auslastung des Holzkessels**:
  - Der Holzkessel soll bei tiefstmöglichem Leistungsniveau kontinuierlich dem mittleren Lastverlauf folgen.
  - Häufige Start- und Ausbrandphasen sind durch lange Betriebszeiten, also durch eine hohe Auslastung des Holzkessels, zu vermeiden.
  - Der Holzkessel soll langsamen Laständerungen des Wärmenetzes (z. B. in Abhängigkeit der Aussentemperatur) gut nachfahren können.
  - Kurzfristige Leistungsänderungen sind zu vermeiden, da das Brennstoffbett viel Zeit braucht, um sich optimal an die neue Feuerungsleistung anzupassen.
  - Die Leistungsvorgabe an den Holzkessel hat langsamer zu erfolgen als die Reaktionszeit des Holzkessels. Dazu ist in der Regel ein Wärmespeicher notwendig, welcher kurzfristige Lastspitzen und Lastabsenkungen ausgleichen kann.
- **Jährlicher Wärmeproduktionsanteil Holzkesselanlage:**
  - Monovalente Holzfeuerungsanlage: 100 %
  - Bivalente Holzfeuerungsanlage mit Öl-/Gaskessel für Spitzenlastbetrieb und Schwachlastbetrieb im Sommer: 80 % bis 85 %
  - Bivalente Holzfeuerungsanlage mit Öl-/Gaskessel für Spitzenlastbetrieb: 90 % bis 95 %
- **Versorgungssicherheit**: Die Versorgungssicherheit respektive die Redundanz beim Ausfall eines Holzkessels kann durch folgende Massnahmen sichergestellt werden:
  - Spitzenlastkessel mit Öl oder Gas (Bioöl-/Biogas), Kesselleistung ≤ Gesamt-Wärmeleistungsbedarf Wärmeerzeugung
  - Anschlussstutzen für mobile Heizzentrale bei monovalenter Holzfeuerungsanlage
  - Lastabwurf von Grosswärmeabnehmern mit redundanter Öl-/Gaskesselanlage
  - Anschlussstutzen für mobile Heizanlagen bei der Heizzentrale oder bei ausgewählten Grosswärmeabnehmerinnen oder -abnehmern (z. B. Industriebetriebe mit kritischen Produktionsprozessen).

Begriffe:

Glutbettunterhalt
Damit eine Holzfeuerung nach einigen Stunden ohne Leistungsanforderung ohne Fremdzündung wieder starten kann, wird während dieser Bereitschaftszeit das Glutbett aufrechterhalten, indem periodisch kleine Brennstoffmengen nachgeschoben werden.

Emissionsarmer und kontrollierter Glutbettunterhaltsbetrieb
Periodisch wird eine kleine Brennstoffmenge auf den Rost nachgeschoben und kontrolliert mit eingeschalteten Verbrennungsluftventilatoren auf ein Glutbett hinuntergebrannt. Nach dem Ausschalten der Verbrennungsluftventilatoren sollte das erneuerte Glutbett keine Brennstoffteile mehr enthalten, die im Pyrolyseprozess noch Schwelgase abgeben.

Automatische Zündung
Bei trockenem Brennstoff (Wassergehalt M < 35 % bis maximal M < 40 %) wird die Feuerung emissionsarm ausgeschaltet, indem das Brennstoffbett in der Ausbrandphase mit eingeschalteten Verbrennungsluftventilatoren auf ein Glutbett hinunter abgebrannt wird. Dieses soll beim Ausschalten der Verbrennungsluftventilatoren keine Brennstoffteile mehr enthalten, die noch Schwelgase abgeben. Nach der Stillstandsphase wird bei erneuter Leistungsanforderung der Verbrennungsvorgang mit einer automatischen Zündung (Zündgebläse oder Zündstäbe) gestartet.

Einschaltdauer
Die Einschaltdauer umfasst die reguläre Betriebszeit und die Bereitschaftszeit (Glutbettunterhalt oder Betriebsphase ohne Leistungsanforderung) einer Feuerungsanlage zwischen Beginn und Ende der Heizperiode.

13.4 Brennstoffqualität und Feuerungssystem

Zur Systemwahl gehört die Auswahl des Feuerungssystems des Holzkessels, das durch die Brennstoffqualität bestimmt wird.

Die Klassifizierung von Brennstoffen und Partikelgrössen von QM Holzheizwerke basiert auf den Spezifikationen gemäss EN ISO 17225-1, die Klassifizierung von Partikelgrössen wurde ergänzt mit den S-Klassen von EN ISO 17225-4.

QM Holzheizwerke hat die Brennstoffklassifizierung zusätzlich mit Qualitäts-Hackschnitzeln fein/grob ergänzt und den Querschnitt von übergrossen Partikeln im Vergleich zur Norm weiter eingeschränkt. Die Brennstoffklassifizierung ist detailliert in Kapitel 4 Energieholz beschrieben. Mit Tabelle 13.3 als Orientierungshilfe kann einer vorgegebenen Brennstoffqualität das empfohlene Feuerungssystem im entsprechenden Leistungsbereich zugeordnet werden.

Tabelle 13.3 Empfohlener Einsatzbereich von Holzbrennstoffen (gemäss Brennstoffklassifizierung) für Feuerungssysteme und Leistungsbereiche (siehe auch FAQ 36).

Brennstoffklassifizierung	Feuerungssystem	Leistungsbereich	Bemerkungen
WS- und IS-P16S-M20	Kleinfeuerungen, Standard-Seriengeräte Unterschub-, Festrostfeuerung*	20 kW - 200 kW	Qualitäts-Hackschnitzel fein gesiebt mit F05
WS- und IS-P31S-M20	Standard-Seriengeräte Unterschub-, Festrostfeuerung*	> 100 kW	Qualitäts-Hackschnitzel grob gesiebt mit F05
WS- und IS-P31S-M35	Unterschub- und Vorschubrostfeuerung	> 200 kW	
WS- und IS-P31S-M50	Unterschub- und Vorschubrostfeuerung	> 200 kW	
WS- und IS-P31S-M55+	Vorschubrostfeuerung	> 200 kW	
P31-M35	Vorschubrostfeuerung	> 200 kW	PWK, LH, DH
P31-M50	Vorschubrostfeuerung	> 200 kW	PWK, LH, DH
P31-M55+	Vorschubrostfeuerung	> 200 kW	PWK, LH, DH
WS- und IS-P45S-M35	Vorschubrostfeuerung	> 500 kW	
WS- und IS-P45S-M50	Vorschubrostfeuerung	> 500 kW	
WS- und IS-P45S-M55+	Vorschubrostfeuerung	> 500 kW	
P45-M35	Vorschubrostfeuerung	> 1'000 kW	PWK, LH, DH, AH
P45-M50	Vorschubrostfeuerung	> 1'000 kW	PWK, LH, DH, RZ
P45-M55+	Vorschubrostfeuerung	> 1'000 kW	PWK, LH, DH, RZ
P63-M35	Vorschubrostfeuerung	> 3'000 kW	PWK, LH, DH, AH
P63-M50	Vorschubrostfeuerung	> 3'000 kW	WS, IS, PWW, PWK, LH, DH, RZ
P63-M55+	Vorschubrostfeuerung	> 3'000 kW	WS, IS, PWW, PWK, LH, DH, RZ

Es wird vorausgesetzt, dass die Forderungen für die Speicherkapazität (Q-Leitfaden; Tabelle 19) und für die minimale mittlere Tagesheizlast bei Schwachlastbetrieb (Q-Leitfaden; Tabelle 20) erfüllt sind.

*Festrostfeuerung: Rostfeuerung ohne aktive Bewegung/Förderung des Brennstoffs auf dem Rost (z. B. Planrost, Schrägrost). Der Brennstoff wird mit der Beschickungsschnecke über den Rost gefördert, die Asche kann zum Beispiel durch Kippen der Rostsegmente entfernt werden.

Vorgaben für Restholz aus der Holzverarbeitung (RHH-M10-20, Hackschnitzel und Späne mit hohem Staubanteil):

- Für Unterschub- und Rostfeuerungen maximal 50 % Staubanteil zulässig, darüber Staubeinblasfeuerung vorsehen
- Zur Vermeidung von Schlackenbildung im Brennstoffbett ist der Einsatz einer Primär-Abgasrezirkulation zu prüfen (siehe Kapitel 5.3.2).
- Die Stückigkeit (Anteile Hackschnitzel, Späne und Staub) und die chemische Zusammensetzung auf Basis von Brennstoffanalysen bilden die Basis bezüglich der Garantieleistungen des Feuerungsherstellers.

13.5 Auswahl und Auslegung des Wärmeerzeugungssystems

Für die Auswahl und Auslegung des Wärmeerzeugungssystems müssen folgende Eckdaten bekannt sein:

- Jährlicher Gesamtwärmebedarf[1)]
- Wärmeleistungsbedarf[1)] und Lastkennlinie[1)] der Gesamtanlage
- Jahresdauerlinie der benötigten Wärmeleistung mit Holzkessel- und Bandleistungsanteilen[1)]
- Zukünftige Entwicklung des Wärmeabsatzes (thermische Sanierungen, Klima, Ausbaupotenzial, «Risikokunden»)
- Minimale mittlere Tagesheizlast bei Schwachlastbetrieb in den Ausbaustufen gemäss Tabelle 13.4
- Vorlauftemperatur T_{VL} als Funktion der Aussentemperatur
- Hauptrücklauftemperatur T_{RL}
- Brennstoffangebot und -qualität in Abhängigkeit der Brennstofflogistik: direkte oder indirekte Versorgungskette
- Abwärme- und Wärmequellenpotenziale

[1)] gemäss Excel-Tabelle Situationserfassung

In Kapitel 13.3 sind die Anforderungen angeführt, welche für die Wahl einer monovalenten oder bivalenten Holzkesselanlage entscheidend sind. Die Anforderungen an die Betriebsweise und die Auslastung der Holzkessel bestimmen die Auslegung der Nennleistung und der Anzahl der Kessel.

Vorgehen

- Auswahl des Wärmeerzeugungssystems als Grundvariante:
  - Nach Leistungsklasse gemäss Tabelle 13.5
  - Aufteilung der Wärmeleistung der einzelnen Wärmeerzeuger bei bivalenten Anlagen und Bestimmung des Brennstoffbedarfs
- Auswahl des Feuerungssystems in Abhängigkeit der Brennstoffqualität respektive der Brennstofflogistik (direkte oder indirekte Versorgungskette)
- Auslegung der Anlagenkomponenten:
  - Feuerungsanlage mit Zusatzkomponenten (Brennstofflager, Brennstofftransportsystem, Abgasreinigung usw.)
  - Hydraulische Einbindung inklusive Volumen des Wärmespeichers
  - Heizzentrale
  - Kamin (Abgasanlage)
- Überprüfen der Einhaltung von Sicherheits-, Lärmschutz- und Emissionsanforderungen
- Überprüfen der festgelegten Grundvariante unter Einbezug der Zusatzvarianten (Kapitel 13.6) und Zusatzoptionen (Kapitel 13.7)
- Bestimmung der Investitions- und Jahreskosten, Beurteilung der Wirtschaftlichkeit (Kapitel 10).

13.5.1 Grundvarianten von Wärmeerzeugungssystemen mit Holzfeuerungsanlage

Wärmeerzeugungsanlagen mit Holzfeuerungen können als Ein- oder Mehrkesselanlagen, monovalent oder bivalent mit Speicher ausgeführt werden. Ist der erforderliche Gesamt-Wärmeleistungsbedarf mit Berücksichtigung von Lastkennlinie und Jahresdauerlinie des Wärmeleistungsbedarfs der Gesamtanlage und Ausbaustufen bestimmt und sind alle an die Holzfeuerungsanlage gestellten Anforderungen genau festgelegt, so wird eine der in Tabelle 13.5 zusammengefassten Grundvarianten von Wärmeerzeugungssystemen ausgewählt.

Alle aufgeführten Grundvarianten weisen einen Wärmespeicher auf, um die allgemeinen Anforderungen gemäss Kapitel 13.3 zu erfüllen.

Grundvarianten ohne Speicher können nur dann gewählt werden, wenn die Holzfeuerungsanlage mit Bandlast betrieben wird.

Für die Auswahl des Wärmeerzeugungssystems müssen neben der Leistungsklasse folgende **Q-Forderungen und Einflussfaktoren** berücksichtigt werden:

- **Vollbetriebsstundenzahl** Holzkessel Tabelle 13.5; Voraussetzung zur Erreichung hoher jährlicher Volllastbetriebsstundenzahlen ohne erhöhten Verschleiss ist eine gleichmässige Auslastung (geringe Anzahl von Start- und Stopphasen, langsame Leistungsänderungen, stabiles Brennstoffbett) und eine Industriebauweise der Kessel. Die Vollbetriebsstundenzahl des Holzkessels in h/a ist definiert als die Division der Jahreswärmeproduktion in kWh/a der Holzkessel durch die Nennwärmeleistung der Holzkessel in kW.
- **Einschaltdauer**: Ganzjährig oder während der Heizperiode.
- **Schwachlastbedingung** gemäss Tabelle 13.4
  Bei Ganzjahresbetrieb ist die Schwachlastbedingung im Sommer zu erfüllen. Bei Betrieb während der Heizperiode gilt sie in der Übergangszeit.
- **Laständerungen**:
  - Grosse, schnelle Lastschwankungen (Lastspitzen und Lastabsenkungen) treten bei folgenden Situationen auf: morgendliche Aufheizspitzen, abendliches Absenken des Heizwärmebedarfs (Nachtabsenkung), Wassererwärmung im Sommer (insbesondere bei Durchflusswassererwärmern, Frischwassermodulen), spezielle Lastprofile (zum Beispiel Wintersportort, Sporthotel), Zuschalten eines Wärmeübertragers bei Netztrennung in der Heizzentrale, Hochfahren oder Absenken der Vorlauftemperatur der Fernleitung usw.
  - Tagesgang mit hohen Lastschwankungen (Lastspitzen und Lastabsenkungen) tritt bei folgenden Situationen auf: Gewächshäuser (keine Lastabnahme bei Sonneneinstrahlung, hohe Lastabnahme bei klarer Nacht), morgendliches Aufheizen von Aussenbädern, ungleichmässige Lastprofile für Prozesswärme usw.
- **Bandlast** z. B. Prozesswärme, Bandlastbetrieb infolge kleiner Holzkesselnennleistung im Verhältnis zum Wärmeleistungsbedarf.
- **Brennstoffsortiment** stellt Anforderung an das Beschickungs- und Feuerungssystem.
- **Anlageninvestition**
- **Versorgungssicherheit/Redundanz**: Die Störanfälligkeit des Beschickungs- oder Feuerungssystems und damit die Versorgungssicherheit hängt wesentlich davon ab, wie gut die festgelegte Brennstoffqualität eingehalten wird. Die Redundanz entspricht derjenigen Wärmeleistung (in Prozent des Wärmeleistungsbedarfs), die beim Ausfall des grössten Kessels noch erbracht werden kann.
- **Holzenergieanteil**
- **Brennstoffpreis**: Bei niedrigen Brennstoffpreisen wird der Ganzjahresbetrieb der Holzfeuerungsanlage bevorzugt.
- **Flexibilität/Ausbaureserve**: Mehrkesselanlagen ermöglichen eine optimale Auslastung der einzelnen Holzkessel bei etappenweiser Erschliessung eines Wärmeversorgungsgebietes.
- **Stand der Technik**: Feuerungen mit einer Nennleistung bis etwa 500 kW können bei einem Wassergehalt im Brennstoff von < M35 – M40 beispielsweise ohne Glutbettunterhalt mit einer automatischen Zündung betrieben werden. Dies ermöglicht einen Schwachlastbetrieb mit geringen Emissionen und reduzierten energetischen Verlusten und ist speziell bei monovalenten Holzfeuerungsanlagen von Bedeutung.

- **Minimal erforderliche konstante Lastabnahme**: Bei Holzfeuerungen mit einem Einschub-Beschickungssystem («Einschieber») ist zur Verhinderung von Rückbränden im Einschubkanal eine minimale konstante Lastabnahme erforderlich. Für diese gelten folgende Richtwerte:
  - trockener Brennstoff < M35: 30 % der Holzkessel-Nennleistung
  - feuchter Brennstoff > M40: 20 % der Holzkessel-Nennleistung

Tabelle 13.4 Minimale mittlere Tagesheizlast bei Schwachlastbetrieb auf Basis des Q-Leitfadens [15] (Tabelle 20).

Feuerungsart →	**Vorschubrostfeuerungen**					**Unterschub- und Festrostfeuerungen**		
Empfehlungen ↓	mit autom. Zündung		mit Glutbettunterhalt			mit autom. Zündung		mit Glutbettunterhalt
Wassergehalt	≤ M35	M35 - 40	≤ M35	M35 - 50	> M50	M ≤ M35	M35 - 40	≤ M50
Minimale mittlere Tagesheizlast in Prozent der Kesselnennleistung bei Wärmeerzeugung mit Wärmespeicher	15 %	20 %	15 %	20 %	30 %	10 %	15 %	15 %

Wichtiger Hinweis: Je nach Holzkesselhersteller können die Werte etwas abweichen. Massgebend sind immer die Werte und Empfehlungen des Holzkesselherstellers.

Schwachlastbedingung

Das Einhalten der Schwachlastbedingung vermeidet die folgenden Probleme bei zu geringer Lastabnahme:

- Geruchsbelästigung
- Periodisch sichtbarer Rauch
- Gefahr der Versottung des Holzkessels
- Eingeschränkte Wirksamkeit des Partikelabscheiders, weil dieser die Betriebstemperatur nicht erreicht und somit im Schwachlastbetrieb nur beschränkt oder gar nicht wirkt. Dies hat eine reduzierte oder allenfalls ungenügende Verfügbarkeit des Abscheiders zur Folge.
  - Elektro-Partikelabscheider: Bei Taupunktunterschreitung besteht die Gefahr von feuchten Partikelanbackungen im Gehäuse, an den Isolatoren und an den Abscheideelektroden. Folgen: Kurzschluss über Isolatoren, Ausfall der automatischen Abreinigung und Ascheaustragung.
  - Gewebefilter: Bei Taupunktunterschreitung besteht die Gefahr von feuchten Partikelanbackungen am Filtergewebe. Folgen: Ausfall der automatischen Abreinigung bis zur Zerstörung des Filtergewebes.
  - Details zu den Abscheideverfahren sind in Kapitel 5.8 zu finden.

Folgende Rahmenbedingungen sind dabei zu beachten:

- Vorschubrostfeuerungen müssen infolge des grösseren Brennstoffbetts (Glutbetts) mit einer höheren Minimalleistung betrieben werden als Unterschub- oder Festrostfeuerungen.
- Der Vorteil einer automatischen Zündung ist, dass sie eine automatische Folgeschaltung ermöglicht und die minimale Wärmeabnahme bei Glutbettunterhalt entfällt. Im Schwachlastbetrieb können sich dadurch Vorteile gegenüber einer Anlage mit Glutbettunterhalt ergeben.
- Bei Anlagen mit Wärmespeicher und automatischer Zündung kann der Speicher im Schwachlastbetrieb ohne Auftreten von kurzfristigen, hohen Lastschwankungen mit minimaler Kesselleistung vollständig gefüllt und dann wieder vollständig entleert werden. Dadurch kann ein längerer kontinuierlicher Betrieb mit minimaler Kesselleistung erreicht werden.

  Beispiel: Holzkessel-Maximalleistung = 200 kW; Wärmebedarf im Sommerbetrieb = 300 kWh pro Tag; Speicher- und Fernleitungsverluste im Sommerbetrieb = 180 kWh pro Tag.

$$\textit{Tagesheizlast in Prozent der Kesselnennleistung} = \frac{300\,\frac{kWh}{d} + 180\,\frac{kWh}{d}}{24\,\frac{h}{d} * 200\,kW} = 0.10 = 10\,\%$$

- Bei Verwendung von trockenen Holzhackschnitzeln von guter Qualität (M ≤ 35 %) sollte bei dieser Anlage ein Sommerbetrieb mit einer Unterschub- oder Festrostfeuerung möglich sein, wenn eine automatische Zündung und ein Wärmespeicher vorhanden sind.
- Bei Anlagen ohne Sommerbetrieb muss der Betrieb in der Übergangszeit die gleichen Forderungen erfüllen. Oft ist es deshalb notwendig, bei Schwachlastbetrieb zunächst noch den Öl-/Gaskessel (falls vorhanden) oder den kleinen Holzkessel (bei monovalenten Anlagen) zu betreiben.

13.5.1.1 Einfluss des Gesamt-Wärmeleistungsbedarfs

Der Gesamt-Wärmeleistungsbedarf bestimmt die Leistungsklasse der Grundvarianten eingeteilt in folgende Gruppen:

- 100 kW bis 500 kW
- 501 kW bis 1'000 kW
- > 1'000 kW

Bei bivalenten Anlagen muss die Aufteilung der Leistung des Holzkessels respektive der Holzkessel auf Basis der Jahresdauerlinie gemäss Bild 13.5 erfolgen, sodass die minimale Vollbetriebsstundenzahl des Holzkessels respektive der Holzkessel unter Berücksichtigung der minimal geforderten mittleren Tagesheizlast bei Schwachlastbetrieb erreicht wird.

Tabelle 13.5 Übersicht über die Grundvarianten von Wärmeerzeugungssystemen mit Speicher in Abhängigkeit des Gesamt-Wärmeleistungsbedarfs auf Basis von Tabelle 19 des Q-Leitfadens [15]. In den Standard-Schaltungen – Teil I [62] sind die Schaltungen WE1 bis WE8 ausführlich beschrieben und in den Standard-Schaltungen – Teil II [71] die Schaltungen WE12 bis WE16.

Schaltung	Beschreibung	Gesamt-Wärmeleistungsbedarf		
		100 - 500 kW	501 - 1'000 kW	> 1'000 kW
1 Holzkessel mit Speicher WE2 (WE12)	Jahreswärmeprod. mit Holz	100 %		
	Auslegung Holzkesselleistung	100 % ohne Lastspitzen		
	Vollbetriebsstundenzahl Holzkessel	> 2'000 h/a		
	Schwachlastbetrieb	Sommerbetrieb möglich, wenn genügend Sommerlast gemäss Tabelle 13.4		
	Automatische Zündung?	Ja		
	Brennstoff	Maximal P31S; bei automatischer Zündung ≤ M40		
	Ausbaureserve	Wegen Schwachlastproblematik nur in Ausnahmefällen möglich		
	Speicherkapazität	≥ 1 h bezogen auf Nennleistung des Holzkessels		
1 Holzkessel + 1 Öl-/Gaskessel mit Speicher WE4 (WE14/16 mit 1 Holzkessel)	Jahreswärmeprod. mit Holz	80 - 90 %		Bei Anlagen ohne Sommerbetrieb kann möglicherweise auch über 1'000 kW nur 1 Holzkessel + 1 Öl-/Gaskessel sinnvoll sein
	Auslegung Holzkesselleistung	50 - 60 %*		
	Auslegung Öl-/Gaskesselleistung	Mindestens auf 70 %, maximal auf 100 %		
	Vollbetriebsstundenzahl Holzkessel	> 3'500 h/a Ziel 4'000 h/a		
	Schwachlastbetrieb	Wenn Tabelle 13.4 nicht erfüllt, durch Öl-/Gaskessel		
	Automatische Zündung?	Ja		
	Brennstoff	Maximal P31S; bei automatischer Zündung ≤ M40	Keine Einschränkung; bei automatischer Zündung ≤ M40	
	Ausbaureserve	Durch Öl-/Gaskessel möglich (mit entsprechender Reduktion des Holz-Deckungsgrades)		
	Speicherkapazität	≥ 1 h bezogen auf Nennleistung des Holzkessels		
2 Holzkessel mit Speicher WE6	Jahreswärmeprod. mit Holz	→ Realisierung eines monovalenten Sommerbetriebs eventuell nur mit zwei Holzkesseln möglich	100 %	
	Auslegung Holzkesselleistung 1		33 % ohne Lastspitzen	
	Auslegung Holzkesselleistung 2		67 % ohne Lastspitzen	
	Vollbetriebsstundenzahl Holzkessel 1 + 2		> 2'000 h/a	
	Schwachlastbetrieb		Einhaltung von Tabelle 13.4 mit dem kleinen Holzkessel in der Regel möglich	

Schaltung	Beschreibung	Gesamt-Wärmeleistungsbedarf		
		100 - 500 kW	**501 - 1'000 kW**	**> 1'000 kW**
	Automatische Zündung?		Für den kleinen Holzkessel	
	Brennstoff		Max. P31S; bei automatischer Zündung ≤ M40	Keine Einschränkung; bei automatischer Zündung ≤ M40
	Ausbaureserve		Mit entsprechend hohen Investitionskosten möglich (teure Holzkessel)	
	Speicherkapazität		≥ 1 h bezogen auf 2/3 der Gesamtnennleistung der Holzkessel	
Schaltung	**Beschreibung**	**Gesamt-Wärmeleistungsbedarf**		
		100 - 500 kW	**501 - 1'000 kW**	**> 1'000 kW**
2 Holzkessel + 1 Öl-/Gaskessel mit Speicher WE8 (WE14/16 mit 2 Holzkesseln)	Jahreswärmeprod. mit Holz			80 - 90 %
	Auslegung Holzkesselleistung 1			17 - 20 %*
	Auslegung Holzkesselleistung 2			33 - 40 %*
	Auslegung Öl-/Gaskesselleistung			Min. 100 % – kl. Holzkessel, max. auf 100 %
	Vollbetriebsstundenzahl Holzkessel 1 + 2			> 3'000 h/a Ziel 4'000 h/a
	Schwachlastbetrieb			Einhaltung von Tabelle 13.4 mit dem kleinen Holzkessel oder dem Öl-/Gaskessel
	Automatische Zündung?			Für den kleinen Holzkessel
	Brennstoff			Keine Einschränkung; bei automatischer Zündung ≤ M40
	Ausbaureserve			Durch Öl-/Gaskessel möglich (mit Reduktion des Holz-Deckungsgrades)
	Speicherkapazität			≥ 1 h bezogen auf 2/3 der Gesamtnennleistung der Holzkessel
* Richtwert für Anlagen mit vorwiegend Raumwärme				

13.5.1.2 Bestimmung der erforderlichen Gesamtkesselleistung

Die Bestimmung der erforderlichen Gesamtkesselleistung geschieht folgendermassen:

- Bei **bivalenten** Holzkesselanlagen anhand des Gesamt-Wärmeleistungsbedarfs. Dies entspricht dem blauen Quadrat der ausgezogenen Lastkennlinie in Bild 13.4 (Gesamt-Wärmeleistungsbedarf inklusive Lastspitzen).
- Bei **monovalenten** Holzkesselanlagen mit Speicher anhand des mittleren Gesamt-Wärmeleistungsbedarfs. Das entspricht dem schwarzen Rhombus der gestrichelten Lastkennlinie in Bild 13.4 (Tagesmittelwert des Gesamt-Wärmeleistungsbedarfs ohne Lastspitzen). Damit wird eine Überdimensionierung der Holzkessel verhindert, wobei kurzfristige Lastspitzen (3 bis 4 Stunden) durch den Wärmespeicher abzudecken sind.

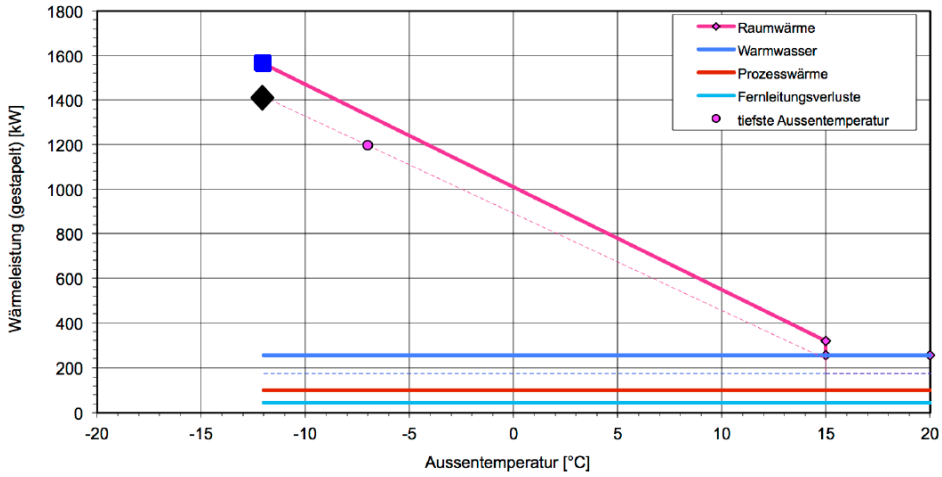


Bild 13.4 Bestimmung der erforderlichen Gesamtkesselleistung bei einer bivalenten oder monovalenten Holzkesselanlage mit Hilfe der Lastkennlinie.

13.5.1.3 Aufteilung Gesamtholzkesselleistung auf kleineren und grösseren Holzkessel

Bei monovalenten oder bivalenten Holzheizungsanlagen mit zwei respektive drei Holzkesseln ist das Verhältnis der Nennleistung des kleinen Holzkessels zur Nennleistung des grossen Holzkessels nicht grösser als 1:2 (empfohlener Bereich 1:1 bis 1:2) zu wählen (Bild 13.5). Dies ermöglicht einen **gemeinsamen Übergangsbereich,** also einen gemeinsamen Leistungsbereich, welcher je eine optimale Betriebsweise für beide Holzkessel im Einzelbetrieb ermöglicht. Diese Aufteilung ist auch bei Mehrkesselanlagen mit Standard-Seriengeräten zu beachten.

Der gemeinsame Übergangsbereich ist erforderlich,

- damit nach Inbetriebnahme des grösseren Holzkessels beim Übergang zur kalten Jahreszeit seine minimale erforderliche Auslastung gemäss Tabelle 13.4 auch bei einer unerwarteten Warmwetterperiode ohne erneutes Ausschalten des grösseren Holzkessels mit erneuter Inbetriebnahme des kleineren Holzkessels gewährleistet werden kann.
- damit nach dem Ausschalten des grösseren Holzkessels und der Inbetriebnahme des kleineren Holzkessels beim Übergang zur warmen Jahreszeit auch während einer kurzen Kaltwetterperiode keine erneute Inbetriebnahme des grösseren Holzkessels mit erneutem Ausschalten des kleineren Holzkessels notwendig wird.

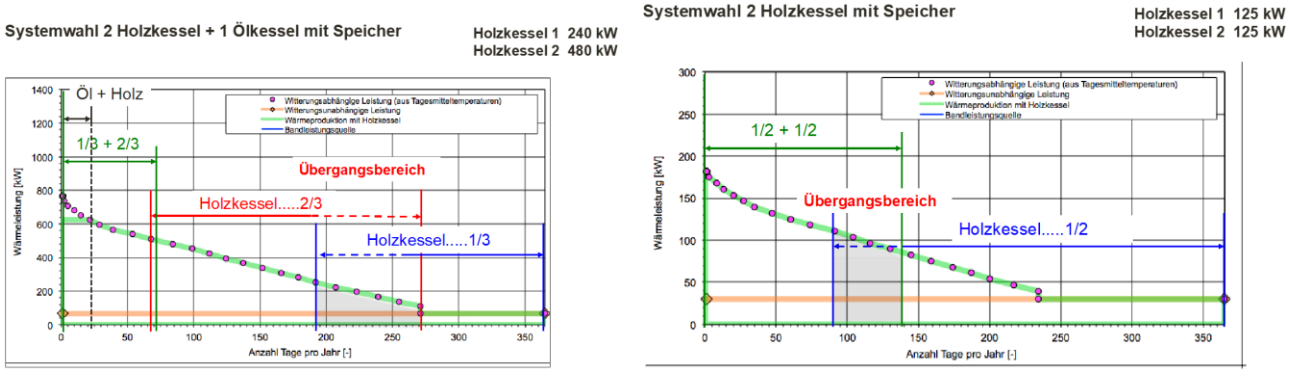


Bild 13.5 Betriebsphasen und Übergangsbereich bei Anlagen mit zwei Holzkesseln am Beispiel der Jahresdauerlinie (links mit fossilem Kessel, rechts ohne fossilen Kessel).

Die Detaildaten zur Jahresdauerlinie links «Bivalente Dreikesselanlage mit Speicher» sind:

- Minimale mittlere Tagesheizlast bei Schwachlastbetrieb effektiv 67 kW
- Kleiner Holzkessel 240 kW, minimale erforderliche mittlere Tagesheizlast bei Schwachlastbetrieb 48 kW (Annahme 20 % der Kesselleistung gemäss Tabelle 13.4, Vorschubrostfeuerung, M35 bis M50)
- Grosser Holzkessel 480 kW, minimale erforderliche mittlere Tagesheizlast bei Schwachlastbetrieb 96 kW (Annahme 20 % der Kesselleistung gemäss Tabelle 13.4)

Die Detaildaten zur Jahresdauerlinie rechts «Monovalente Zweikessel-Holzheizungsanlage mit Speicher» sind:

- Minimale mittlere Tagesheizlast bei Schwachlastbetrieb effektiv 30 kW
- Holzkessel 1 und Holzkessel 2 je 125 kW, minimale erforderliche mittlere Tagesheizlast bei Schwachlastbetrieb 13 kW (Annahme 10 % der Kesselleistung gemäss Tabelle 13.4, Unterschub- und Festrostfeuerungen, ≤ M35).

13.5.2 Beschreibung der Grundvarianten

13.5.2.1 Monovalente Holzheizungsanlage mit Speicher 100 bis 500 kW

Beschreibung

Anlagen mit einer Nennwärmeleistung bis maximal 500 kW können mit einer monovalenten Einkesselanlage betrieben werden (ein Holzkessel mit Speicher WE2). Der Speicher dient zur Beruhigung des Kesselbetriebes und zur Abdeckung von Lastspitzen. Diese Anlagen sind relativ kostengünstig und platzsparend. Sie können auch als Grundlage für weitere Ausbaustufen verwendet werden.

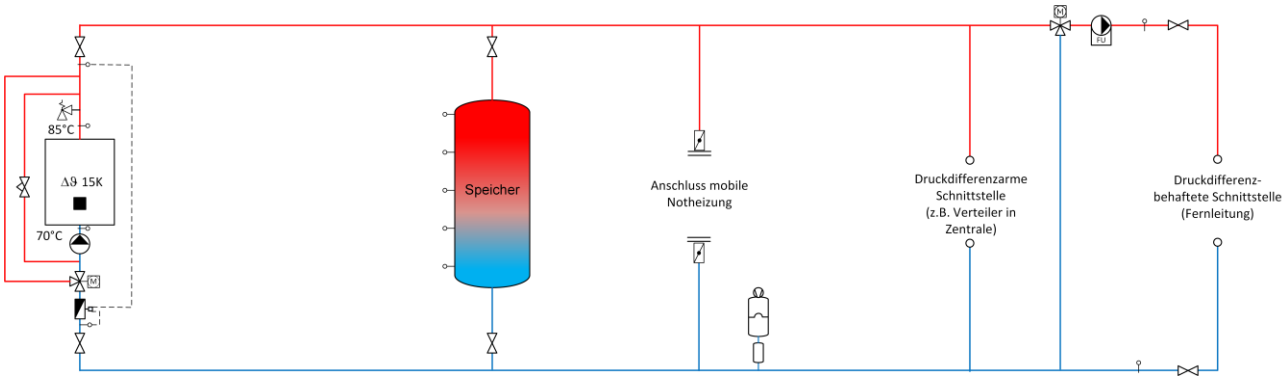


Bild 13.6 Prinzipschema einer Anlage mit einem Holzkessel mit Speicher (WE2).

Die wichtigsten **Eigenschaften** sind:

- Kurzfristige Lastspitzen und -absenkungen werden durch den Speicher ausgeglichen.
- Auslegung der Kesselleistung ohne Berücksichtigung der Lastspitzen (schwarzer Rhombus in Bild 13.4)
- Ganzjahresbetrieb bei ausschliesslichem Wärmebedarf für Raumwärme und Warmwasser nur bei genügend hoher Sommerlast möglich (Schwachlastbedingungen Tabelle 13.4)
- In der Übergangszeit ist der maximale Wassergehalt im Brennstoff auf ≤ M40 beschränkt (automatische Zündung erforderlich).
- Kostengünstige Variante
- Ausbaureserven durch Erweiterung der Anlagen zu WE4, 6 etc. möglich.
- Regelstrategie: Der Holzkessel wird bei möglichst geringer Leistung betrieben, sodass die Kesselleistung gerade dem mittleren Wärmeleistungsbedarf entspricht. Der Speicherladezustand bestimmt die Leistungsvorgabe an den Kessel. In der Übergangszeit oder im Sommerbetrieb wird der Speicher, falls keine kurzfristigen hohen Lastschwankungen auftreten, bei minimaler Kesselleistung im Ein/Aus-Betrieb geladen. Ausführlicher Regelbeschrieb siehe Standard-Schaltungen – Teil I [62].

Schlecht geeignet ist die Lösung WE2:

- wenn kurzfristige hohe Lastschwankungen auftreten, die nicht vom Speicher aufgefangen werden können.
- wenn die Schwachlastbedingungen im Sommerbetrieb nicht eingehalten werden können.
- bei Anlagen im Teilausbau.

Auslegungsgrundsätze

Jahreswärmeproduktion mit Holz	100 %
Auslegung Holzkesselleistung	100 % ohne Lastspitzen (schwarzer Rhombus in Bild 13.4)
Vollbetriebsstundenzahl Holzkessel	> 2'000 h/a
Schwachlastbetrieb	Sommerbetrieb möglich, wenn genügend Sommerlast gemäss Tabelle 13.4
Automatische Zündung?	Ja
Brennstoff	Maximal P31S bei automatischer Zündung ≤ M40
Speicherkapazität	≥ 1 h bezogen auf Nennleistung des Holzkessels

13.5.2.2 Bivalente Holzheizungsanlage mit Speicher 100 bis 1’000 kW

Beschreibung

Zur Erhöhung der Versorgungssicherheit und/oder bei einem etappenweisen Ausbau wird mit einer bivalenten Anlage bei geringen Mehrkosten ein wesentlich stabilerer Betrieb erreicht. Bivalente Anlagen mit einem Holzkessel mit Speicher werden bis zu einem Nennwärmeleistungsbedarf von 1’000 kW empfohlen (ein Holzkessel mit Speicher und fossilem Heizkessel WE4). Der Wärmespeicher dient der Beruhigung des Kesselbetriebes. Die Deckung der Lastspitzen und allenfalls auch der Sommerbetrieb erfolgen durch den fossilen Heizkessel. Dank dem fossilen Heizkessel können auch kurzfristig auftretende Lastschwankungen gedeckt werden, die der Wärmespeicher nicht abfängt. Zudem garantiert der fossile Heizkessel die Versorgungssicherheit bei Ausfall oder Störung des Holzkessels. Diese Anlagen sind relativ kostengünstig und können sehr effizient betrieben werden.

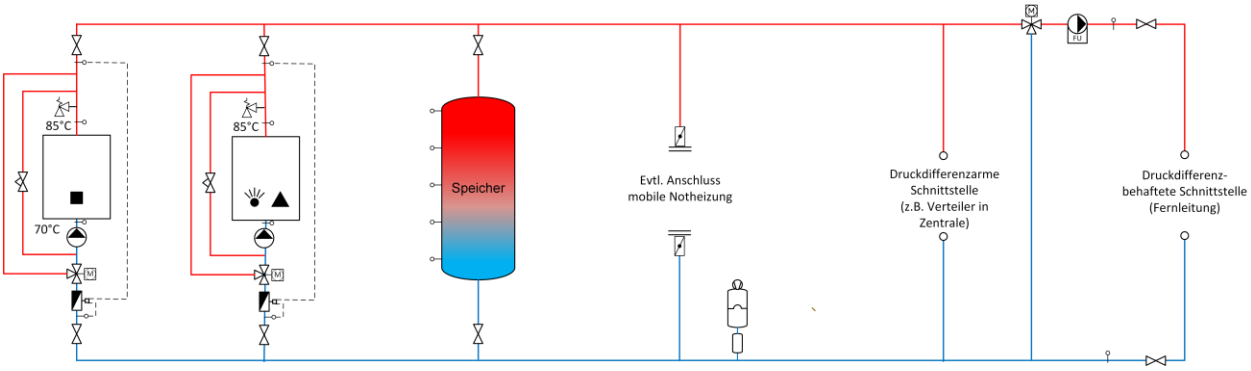


Bild 13.7 Prinzipschema einer Anlage mit einem Holzkessel mit Speicher und fossilem Heizkessel (WE4).

Die wichtigsten **Eigenschaften** sind:

- Kurzfristige Lastspitzen und -absenkungen werden durch den Wärmespeicher ausgeglichen.
- Auslegung der Gesamtkesselleistung inkl. Lastspitzen (blaues Quadrat in Bild 13.4)
- Die Leistung des Holzkessels entspricht bis zum Bivalenzpunkt dem mittleren Wärmeleistungsbedarf und anschliessend einem Anteil der mittleren Tagesheizlast.
- Spitzenlastdeckung mit fossilem Zusatzkessel
- Schwachlastbetrieb in der Übergangszeit und im Sommer bei genügender Last mit Holzkessel, sonst mit fossilem Kessel (Tabelle 13.4)
- Für die automatische Zündung ist der maximale Wassergehalt im Brennstoff auf ≤ M40 beschränkt.
- Kostengünstige Variante für garantierten Ganzjahresbetrieb mit hoher Versorgungssicherheit
- Gute Auslastung des Holzkessels bei entsprechend hohem Deckungsgrad mit Energieholz
- Reserven sind durch den fossilen Anlagenteil abzudecken.
- Wärmeerzeugung hydraulisch und regelungstechnisch erweiterbar, zum Beispiel zu WE8
- Regelstrategie: Der Holzkessel wird bei möglichst geringer Leistung betrieben, sodass die Kesselleistung gerade dem mittleren Wärmeleistungsbedarf entspricht. Der Speicherladezustand bestimmt die Leistungsvorgabe an den Holzkessel. Für den Spitzenlastbetrieb während der kältesten Wintertage wird der fossile Kessel zugeschaltet und unterstützt den Holzkessel. Bei einem Störfall oder Ausfall des Holzkessels übernimmt die fossile Heizung automatisch. Der Sommerbetrieb erfolgt je nach Einhaltung der Schwachlastbedingung mit dem Holzkessel oder dem fossilen Kessel. Falls keine kurzfristigen hohen Lastschwankungen auftreten, wird der Speicher vom Holzkessel bei minimaler Kesselleistung im Ein/Aus-Betrieb geladen (automatische Zündung zwingend). Ist der Holzkessel für den Schwachlastbetrieb nicht geeignet, erfolgt die Sommerdeckung mit dem fossilen Heizkessel. Ausführlicher Regelbeschrieb siehe Standard-Schaltungen – Teil I [62].
- Anlagen ohne Sommerbetrieb oder mit hohem Prozesswärmebedarf können möglicherweise auch über 1’000 kW mit nur einem Holzkessel und einem fossilen Kessel betrieben werden.

Schlecht geeignet ist die Lösung WE4

- wenn eine 100 % fossilfreie Wärmeerzeugung gefordert ist.

Auslegungsgrundsätze

Jahreswärmeproduktion mit Holz	80 bis 90 %
Auslegung Holzkesselleistung	50 bis 60 % Gesamt-Wärmeleistungsbedarf inklusive Lastspitzen (blaues Quadrat in Bild 13.4)
Auslegung fossile Kesselleistung	70 bis 100 % Gesamt-Wärmeleistungsbedarf (hohe Redundanz)
Vollbetriebsstundenzahl Holzkessel	> 3’500 h/a (Ziel 4’000 h/a)
Schwachlastbetrieb	Wenn nicht erfüllt: Sommerbetrieb mit fossilem Kessel
Automatische Zündung	Ja
Brennstoff	bis 500 kW maximal P31S; bei automatischer Zündung ≤ M40
Speicherkapazität	≥ 1 h bezogen auf Nennleistung des Holzkessels

13.5.2.3 Monovalente Holzheizungsanlage mit Speicher 501 bis 1’000 kW

Beschreibung

Durch die Aufteilung der Kesselleistung auf zwei Holzkessel können grössere Anlagen ganzjährig mit Holz betrieben werden (zwei Holzkessel mit Speicher WE6). Es wird empfohlen, die Leistung 1/3 zu 2/3 aufzuteilen. Dies erlaubt in der Regel die Schwachlastdeckung im Sommer mit dem kleineren Kessel und übers Jahr einen ausgeglichenen Betrieb beider Wärmeerzeuger. Der kleine Kessel ist mit einer automatischen Zündung auszurüsten. Zur Beruhigung des Kesselbetriebes und zur Abdeckung von Lastspitzen ist ein Speicher einzubauen.

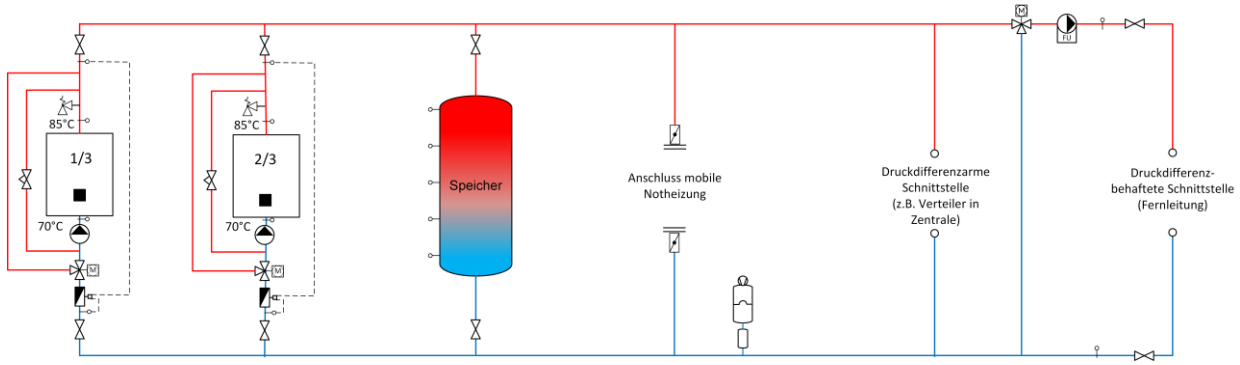


Bild 13.8 Prinzipschema einer Anlage mit zwei Holzkesseln und mit Speicher (WE6).

Die wichtigsten **Eigenschaften** sind:

- Kurzfristige Lastspitzen und -absenkungen der Wärmekunden werden durch den Speicher ausgeglichen.
- Auslegung der Gesamtkesselleistung ohne Lastspitzen (schwarzer Rhombus in Bild 13.4)
- Aufteilung der Kesselleistungen im Verhältnis 1/3 zu 2/3 gemäss Kapitel 13.5.1.3
- Schwachlastbetrieb in der Übergangszeit und im Sommer mit kleinem Kessel in der Regel möglich (Tabelle 13.4)
- Kleiner Kessel mit automatischer Zündung, maximaler Wassergehalt im Brennstoff auf ≤ M40 beschränkt
- Fossilfreier Ganzjahresbetrieb
- Versorgungssicherheit bei Störung eines Holzkessels durch den zweiten Holzkessel bedingt gewährleistet. Für hohe Versorgungssicherheit ist ein Anschluss an eine mobile Heizzentrale vorzusehen.
- Etappenweiser Anschluss der Wärmeabnehmer möglich (bei relativ hohen Investitionskosten)
- Wärmeerzeugung hydraulisch und regelungstechnisch erweiterbar
- Regelstrategie: Beide Holzkessel werden bei möglichst geringer Leistung (gemeinsame gleiche Leistungsvorgabe) betrieben, sodass die Summe der Kesselleistungen gerade dem mittleren Wärmeleistungsbedarf entspricht. Der Speicherladezustand bestimmt die Leistungsvorgabe an die Kessel. Die Kesselkaskade (Folgeschaltung) bestimmt den Betrieb der Kessel. Im Sommerbetrieb wird der Speicher, falls keine kurzfristigen hohen Lastschwankungen auftreten, bei Minimalleistung des kleineren Holzkessels im Ein/Aus-Betrieb geladen. Die Umschaltung des kleineren auf den grösseren Holzkessel erfolgt manuell, wenn der kleinere Holzkessel im Tagesmittel den Wärmebedarf nicht mehr abdecken kann. Die Umschaltung des grösseren auf den kleineren Holzkessel erfolgt manuell, wenn die Tageswärmeproduktion des grösseren Holzkessels (Wärmeproduktion in 24 Stunden bei Minimalleistung) weniger als 25 % seiner maximal möglichen Tageswärmeproduktion (Wärmeproduktion in 24 Stunden bei Nennleistung) beträgt. Die Zuschaltung des kleineren Holzkessels bei automatischer Folgeschaltung und Spitzenlastbetrieb erfolgt mit der automatischen Zündung, wenn der grössere Holzkessel im Stundenmittel den Wärmebedarf nicht mehr abdecken kann. Der kleinere Holzkessel wird erst wieder ausgeschaltet, wenn der Wärmeleistungsbedarf unter die Summe der Minimalleistungen der beiden Holzkessel sinkt. Bei einer Störung des grösseren Holzkessels wird der kleinere Holzkessel mit der automatischen Zündung eingeschaltet. Ausführlicher Regelbeschrieb siehe Standard-Schaltungen – Teil I [62].

Schlecht geeignet ist die Lösung WE6

- wenn kurzfristige hohe Lastschwankungen auftreten, die nicht vom Speicher aufgefangen werden können.
- wenn die Schwachlastbedingungen im Sommerbetrieb mit dem kleinen Kessel nicht eingehalten werden können.

Auslegungsgrundsätze

Jahreswärmeproduktion mit Holz	100 %
Auslegung Holzkesselleistung 1 und 2	33 % respektive 67 % ohne Lastspitzen (schwarzer Rhombus in Bild 13.4)
Vollbetriebsstundenzahl Holzkessel	> 2’000 h/a
Schwachlastbetrieb	Einhaltung Tabelle 13.4 mit kleinem Kessel
Automatische Zündung?	Ja, für kleinen Kessel
Brennstoff	bis 1’000 kW max. P31S bei automatischer Zündung ≤ M40
Speicherkapazität	≥ 1 h bezogen auf mindestens 2/3 der Gesamtnennleistung der Holzkessel (empfohlen jedoch ≥ 1 h bei 100 % der Gesamtnennleistung).

13.5.2.4 Monovalente Holzheizungsanlage mit Speicher ≥ 1'000 kW

Beschreibung

Monovalente Mehrkesselanlagen mit mehr als zwei Holzkesseln können zum Beispiel als Erweiterung von Zweikesselanlagen WE6 beim etappenweisen Ausbau realisiert werden oder, wenn die Schwachlastbedingungen mit dem kleinen Kessel nicht eingehalten werden können (Mehrkesselanlage Holz mit Speicher).

Die Teilleistungsbereiche der Kessel sind so zu wählen, dass sowohl eine problemlose Kesselumschaltung wie auch der Sommerbetrieb gewährleistet sind. Durch die Aufteilung der Kesselnennleistung (z. B. 1/5 zu 2/5 zu 2/5) kann der Betrieb ganzjährig sichergestellt werden. Der kleinste Kessel sollte mit einer automatischen Zündung ausgerüstet sein. Zur Beruhigung des Kesselbetriebes und zur Abdeckung von Lastschwankungen ist ein Speicher einzubauen.

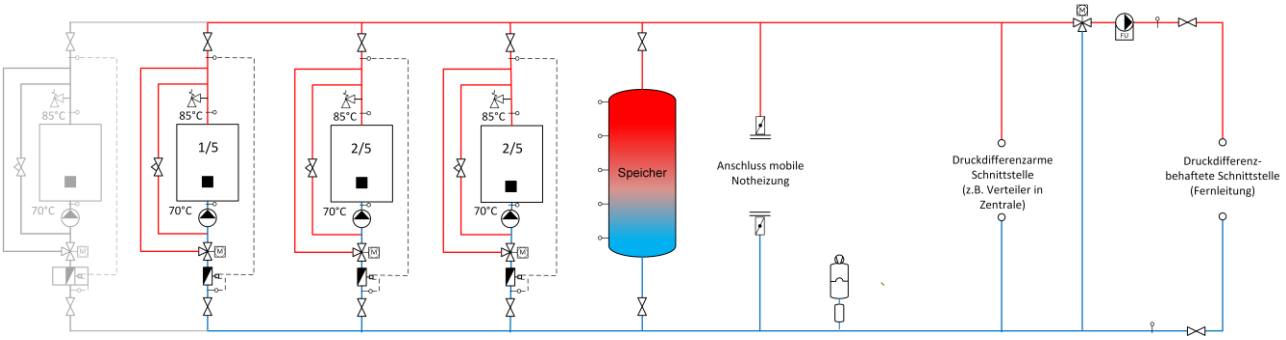


Bild 13.9 Prinzipschema einer Anlage mit mehreren Holzkesseln und mit Speicher (WE6+).

Die wichtigsten **Eigenschaften** sind:

- Kurzfristige Lastspitzen und -absenkungen der Wärmekunden werden durch den Speicher ausgeglichen.
- Auslegung der Gesamtkesselleistung ohne Lastspitzen (schwarzer Rhombus in Bild 13.4).
- Aufteilung der Kesselleistungen so, dass Sommerbetrieb und Kesselumschaltung gewährleistet sind (siehe Kapitel 13.6.1)
- Schwachlastbetrieb in der Übergangszeit und im Sommer mit kleinstem Kessel (Tabelle 13.4)
- Kleinster Kessel (≤ 500 kW) mit automatischer Zündung, maximaler Wassergehalt im Brennstoff auf ≤ M40 beschränkt
- Fossilfreier Ganzjahresbetrieb
- Versorgungssicherheit bei Störung eines Holzkessels durch die anderen Holzkessel bedingt gewährleistet. Für hohe Versorgungssicherheit ist ein Anschluss an eine mobile Heizzentrale vorzusehen.
- Etappenweiser Anschluss der Wärmeabnehmer möglich
- Wärmeerzeugung hydraulisch und regelungstechnisch erweiterbar
- Regelstrategie: Die Holzkessel werden bei möglichst geringer Leistung (gemeinsame gleiche Leistungsvorgabe) betrieben, sodass die Summe der Kesselleistungen gerade dem mittleren Wärmeleistungsbedarf entspricht. Der Speicherladezustand bestimmt die Leistungsvorgabe an die Kessel. Die Kesselkaskade (Folgeschaltung) bestimmt den Betrieb der Kessel. Im Sommerbetrieb wird der Speicher, falls keine kurzfristigen hohen Lastschwankungen auftreten, bei Minimalleistung des kleinsten Holzkessels im Ein/Aus-Betrieb geladen. Die Umschaltung der Holzkessel erfolgt in der Regel manuell. Übersteigt der Wärmeleistungsbedarf die Summe der Nennleistungen der in Betrieb stehenden Holzkessel, wird entweder ein kleiner Holzkessel aus- und ein grosser Holzkessel zugeschaltet oder ein weiterer Holzkessel zugeschaltet. Sinkt der Wärmeleistungsbedarf unter die Summe der Minimalleistungen der in Betrieb stehenden Holzkessel, wird entweder ein kleiner Holzkessel ausgeschaltet oder ein kleiner Holzkessel zu- und ein grosser Holzkessel ausgeschaltet. Die Zuschaltung des kleinsten Holzkessels mit automatischer Zündung kann bei automatischer Folgeschaltung automatisch erfolgen. Bei einer Störung eines grösseren Holzkessels wird der kleinste Holzkessel mit automatischer Zündung dazugeschaltet. Ausführlicher Regelbeschrieb siehe Standard-Schaltungen – Teil I [62].

Schlecht geeignet ist die Lösung WE6+

- wenn kurzfristige hohe Lastschwankungen auftreten, die nicht vom Speicher aufgefangen werden können.

Auslegungsgrundsätze

Jahreswärmeproduktion mit Holz	100 %
Auslegung	Gesamtkesselleistung ohne Lastspitzen (schwarzer Rhombus in Bild 13.4) kleinster Kessel nach Tabelle 13.4, weitere Kessel auf problemlose Kesselumschaltung auslegen (z. B. 1/5 zu 2/5 zu 2/5)
Vollbetriebsstundenzahl Holzkessel	> 2'000 h/a
Schwachlastbetrieb	Einhaltung Tabelle 13.4 mit kleinstem Kessel
Automatische Zündung?	Ja, für kleinen Kessel
Brennstoff	bis 1'000 kW maximal P31S bei automatischer Zündung ≤ M40
Speicherkapazität	≥ 1 h bezogen auf 2/3 der Gesamtnennleistung der Holzkessel (empfohlen jedoch ≥ 1 h bei 100 % Gesamtnennleistung).

13.5.2.5 Bivalente Holzheizungsanlage mit Speicher ≥ 1’000 kW

Beschreibung

Bivalente Mehrkesselanlagen mit zwei oder mehr Holzkesseln ermöglichen in der Regel auch bei grösseren Anlagen den Sommerbetrieb mit Holz (zwei Holzkessel mit Speicher und fossiler Kessel WE8). Sie können auch als Erweiterung von bivalenten Anlagen WE4 oder von Zweikesselanlagen WE6 erstellt werden. Bivalente Anlagen zeichnen sich durch eine hohe Versorgungssicherheit bei geringen Mehrkosten aus. Der Speicher dient der Beruhigung des Holzkesselbetriebes. Dank dem fossilen Heizkessel können auch kurzfristig auftretende Lastschwankungen gedeckt werden, die der Wärmespeicher nicht ausgleichen kann. Diese Anlagen können relativ kostengünstig und sehr effizient betrieben werden.

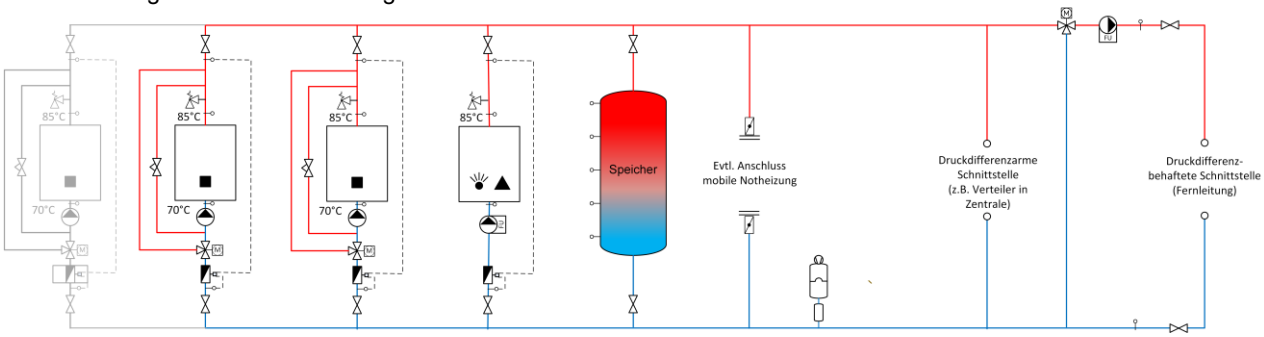


Bild 13.10 Prinzipschema einer Anlage mit zwei Holzkesseln mit Speicher und fossilem Kessel (WE8).

Die wichtigsten **Eigenschaften** sind:

- Kurzfristige Lastspitzen und -absenkungen der Wärmekunden werden durch den Speicher ausgeglichen.
- Auslegung der Gesamtkesselleistung inklusive Lastspitzen (blaues Quadrat in Bild 13.4)
- Aufteilung der Kesselleistung so, dass Sommerbetrieb und Kesselumschaltung gewährleistet sind (siehe Kapitel 13.6.1)
- Schwachlastbetrieb in der Übergangszeit und im Sommer mit kleinstem Holzkessel (Tabelle 13.4)
- Kleinster Holzkessel (≤ 500 kW) mit automatischer Zündung, maximaler Wassergehalt im Brennstoff auf ≤ M40 beschränkt.
- Sehr hohe Versorgungssicherheit
- Gute Auslastung der Holzkesselanlage bei entsprechend hohem Deckungsgrad mit Energieholz
- Reserven sind durch den fossilen Anlagenteil abzudecken.
- Etappenweiser Anschluss der Wärmeabnehmer möglich
- Wärmeerzeugung hydraulisch und regelungstechnisch erweiterbar
- Regelstrategie: Die Holzkessel werden bei möglichst geringer Leistung (gemeinsame gleiche Leistungsvorgabe) betrieben, sodass die Summe der Kesselleistungen gerade dem mittleren Wärmeleistungsbedarf entspricht. Der Speicherladezustand bestimmt die Leistungsvorgabe an die Kessel. Die Kesselkaskade (Folgeschaltung) bestimmt den Betrieb der Kessel. Im Sommerbetrieb wird der Speicher, falls keine kurzfristigen hohen Lastschwankungen auftreten, bei Minimalleistung des kleinsten Holzkessels im Ein/Aus-Betrieb geladen. Die Umschaltung der Holzkessel erfolgt in der Regel manuell. Übersteigt der Wärmeleistungsbedarf die Summe der Nennleistungen der in Betrieb stehenden Holzkessel, wird entweder ein kleiner Holzkessel aus- und ein grosser Holzkessel zugeschaltet oder ein weiterer Holzkessel zugeschaltet. Sinkt der Wärmeleistungsbedarf unter die Summe der Minimalleistungen der in Betrieb stehenden Holzkessel, wird entweder ein kleiner Holzkessel ausgeschaltet oder ein kleiner Holzkessel zu- und ein grosser Holzkessel ausgeschaltet. Die Zuschaltung des kleinsten Holzkessels mit automatischer Zündung kann bei automatischer Folgeschaltung automatisch erfolgen. Für den Spitzenlastbetrieb während der kältesten Wintertage und eventuell für Schwachlastbetrieb im Sommer wird der fossile Kessel eingesetzt. Der fossile Kessel wird bei Spitzenlastbetrieb durch geeignete Kriterien freigegeben oder gesperrt. Bei einer Störung eines grösseren Holzkessels wird der kleinste Holzkessel mit automatischer Zündung dazugeschaltet. Beim Komplettausfall der Holzheizanlage übernimmt der fossile Kessel die Wärmeversorgung. Ausführlicher Regelbeschrieb siehe Standard-Schaltungen – Teil I [62].

Auslegungsgrundsätze

Jahreswärmeproduktion Holz	80 bis 90 %
Auslegung	Gesamtkesselleistung 60 % inklusive Lastspitzen (blaues Quadrat in Bild 13.4) kleinster Kessel nach Tabelle 13.4, weitere Kessel auf problemlose Kesselumschaltung auslegen (z. B. 1/5 zu 2/5 zu 2/5)
Vollbetriebsstundenzahl Holzkessel	> 3’000 h/a
Schwachlastbetrieb	Einhaltung Tabelle 13.4 mit kleinstem Kessel oder fossile Deckung
Automatische Zündung?	Ja, für kleinen Kessel
Brennstoff	bis 1’000 kW maximal P31S bei automatischer Zündung ≤ M40
Speicherkapazität	≥ 1 h bezogen auf 2/3 der Gesamtnennleistung der Holzkessel (empfohlen jedoch ≥ 1 h bei 100 % Gesamtnennleistung).

13.5.3 Vorgehensweise bei der Auslegung einer bivalenten Anlage

Bei der Auslegung der Wärmeerzeuger eines bivalenten Holzheizwerks sind folgende Randbedingungen zu berücksichtigen:

- Die **Jahresdauerlinie** der Wärmeleistung eines Fernwärmenetzes zeigt in Abhängigkeit des Verlaufs der Aussentemperatur eine zeitlich kurze Spitzenlastphase (siehe Bild 13.11).

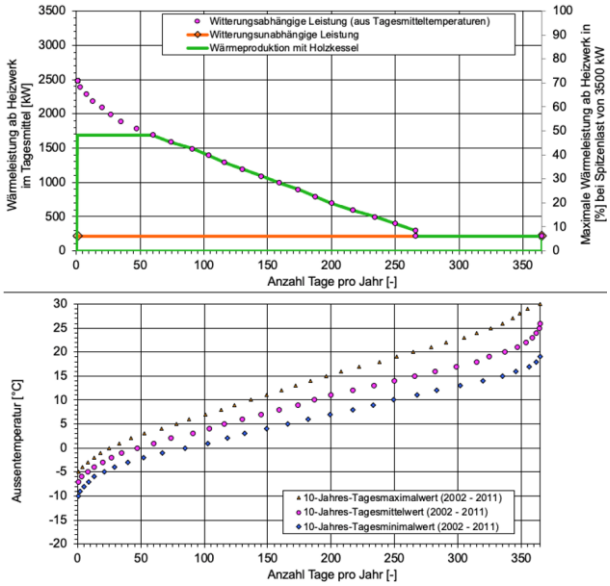


Bild 13.11 Beispielhafte Darstellung der Jahresdauerlinie eines bivalenten Holzheizwerkes. Oben: Jahresdauerlinie der Wärmeleistung im Tagesmittel; Unten: Jahresdauerlinie der Aussentemperatur im Tagesmittel.

- Die **Kostenstruktur** von Wärmeerzeugersystemen ist unterschiedlich. Die Investitionskosten der Holzkessel sind hoch und die Brennstoffkosten niedrig, während Öl- und Gaskessel im Vergleich niedrige Investitionskosten, aber hohe Brennstoffkosten aufweisen.

Tabelle 13.6 Kostenstruktur verschiedener Wärmeerzeugersysteme.

Feuerungsanlage	Investitionskosten (Fixkosten)	Brennstoffkosten (variable Kosten)
Holz	hoch	niedrig
Heizöl, Gas	niedrig	hoch

- Aus diesen Randbedingungen lässt sich ableiten, dass eine bivalente Aufteilung des maximalen Wärmeleistungsbedarfs des Wärmenetzes auf eine Holzfeuerungsanlage zur **Abdeckung der Bandlast** (Grund- und Mittellast) und eine Öl-/Gasanlage zur **Spitzenlastabdeckung** und als Ausfallsreserve zu empfehlen ist. Eine CO_2-neutrale Wärmeerzeugung kann bei dieser Systemvariante nur dann erreicht werden, wenn der fossile Energieträger durch einen erneuerbaren Energieträger wie Biogas (flüssig), Bioheizöl oder qualitativ hochwertigen Holzbrennstoff (Pellets, Qualitäts-Hackschnitzel) ersetzt wird.

  Die Aufteilung der Wärmeleistung einer bivalenten Anlage sollte prinzipiell durch Bestimmung des Kostenoptimums erfolgen. Es müssen aber auch weitere Rahmenbedingungen wie der maximale von der Förderstelle erlaubte Anteil an fossilen Energieträgern, die sinkende Akzeptanz der Nutzung von fossilen Energieträgern bei der Bevölkerung und der Bauherrschaft (Wärmewende zu CO_2-neutraler Wärmeerzeugung) berücksichtigt werden.

- Bei grösseren Anlagen ist es sinnvoll, die Holzheizungsanlage in zwei Holzheizkessel aufzuteilen. Dabei ist folgendes Kriterium von Bedeutung:
  - Die Kostendegression der Investitionskosten stellt in diesem Zusammenhang ein wichtiges Entscheidungskriterium dar, das heisst eine Aufteilung in zwei Holzheizkessel bei einer Summe der Holz-Kesselnennleistungen von unter rund 2 MW ist aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten genau zu prüfen.

Die Erfahrungen von QM Holzheizwerke zeigen, dass mit der Einhaltung der Q-Forderungen gemäss Tabelle 13.4 nicht nur ein technisch einwandfreier Betrieb mit geringen Emissionen gewährleistet werden kann, sondern dass diese Anlagen auch wirtschaftlich am interessantesten sind.

13.5.4 Auswahl des Feuerungssystems

Aufgrund der Auswahl des Wärmeerzeugungssystems und der entsprechenden Auslegungsgrundlagen wird die erforderliche Kesselleistung für einen oder mehrere Kessel bestimmt.

Die verschiedenen Feuerungssysteme sind für die unterschiedlichen Einsatzgebiete mehr oder weniger gut geeignet. Die wichtigsten Kriterien für die Auswahl des Feuerungssystems sind:

- Kesselleistung
- Energieholzsortiment gemäss Kapitel 13.4
- Betriebsweise bei Bandlast- und Schwachlastbetrieb (siehe Anforderungen Tabelle 13.4).

13.5.5 Dimensionierung des Wärmespeichers

Damit die Leistungsvorgabe an den Holzkessel langsamer erfolgen kann als seine Reaktionszeit, ist in der Regel ein Wärmespeicher mit folgenden Funktionen notwendig:

- Ausgleichen von kurzfristigen Lastspitzen und -absenkungen, welche schneller sind als die Reaktionszeit des Holzkessels (gemäss der vorgegebenen Speicherkapazität).
- Erkennen des Lastverlaufes aufgrund der Änderung des Speicherladezustands.

Als **Speichervolumen** wird grundsätzlich eine Speicherkapazität von ≥ 1 h bezogen auf die Nennleistung des Holzkessels empfohlen. Zudem sind allfällige gesetzliche Vorgaben zu berücksichtigen. Treten jedoch hohe

(kurzfristige) Lastspitzen und Lastabsenkungen im Tagesgang auf, wie beispielsweise der Lastverlauf von Gewächshäusern, Prozesswärme oder Lufterhitzern, können diese nur mit einer wesentlich grösseren Speicherkapazität ausgeglichen werden. Für folgende Fälle sind daher folgende Empfehlungen zu beachten:

- **Gewächshäuser**: Um Lastspitzen von Gewächshäusern (in der Nacht wegen Kältestrahlung) und Lastabsenkungen (am Tag bei Sonneneinstrahlung) im Tagesgang auszugleichen, ist die Speicherkapazität auf 4 bis 6 h der Nennleistung des Holzkessels zu erhöhen. Die Nennleistung des Holzkessels soll dabei auf ca. 50 % des maximalen Wärmeleistungsbedarfs ausgelegt werden. Dies hat eine entsprechende Erhöhung der Auslastung respektive der Vollbetriebsstundenzahl zur Folge.
- **Prozesswärme** 2 h - 8 h
- **Lufterhitzer** 1.5 h - 2 h
- **Warmwasseraufbereitung** 1.5 h - 2 h
  (z. B. Frischwasserstationen)
- Beheizung **Aussenschwimmbad** 1.5 h - 2 h.

Um eine Überdimensionierung der Holzkessel einer **monovalenten Holzkesselanlage mit Speicher** zu verhindern, sind kurzfristige Lastspitzen (3 bis 4 h) entsprechend der ausgezogenen Lastkennlinie durch den Speicher abzudecken. Das Speichervolumen hat eine Speicherkapazität aufzuweisen, welche den Lastverlauf so auszugleichen vermag, dass die Holzkesselanlage der mittleren Lastabnahme respektive der gestrichelten Lastkennlinie folgen kann (siehe Bild 11.1).

Bei **zwei und mehr Holzkesseln** kann das minimale Speichervolumen von ≥ 1 h Speicherkapazität auf 2/3 der Gesamtnennleistung der Holzkessel bezogen werden.

In der Excel-Tabelle Situationserfassung Mappe «**Wärmezentrale»** wird das erforderliche Speichervolumen berechnet. Die Speicherkapazität wird direkt über die Temperaturspreizung über den Speicher bestimmt. QM Holzheizwerke gibt vor, dass die Temperaturspreizung über den Speicher > 30 K betragen sollte. Durch eine Temperaturspreizung von 40 K lässt sich die Speicherkapazität bei einem bestehenden Speichervolumen im Vergleich zu einer Temperaturspreizung von 30 K beträchtlich erhöhen. Für eine optimale Speicherbewirtschaftung sind eine konstante hohe Vorlauftemperatur und eine konstante tiefe Rücklauftemperatur notwendig.

Weitere Hinweise zur Funktion der Wärmespeicher inklusive Voraussetzungen für eine optimale Bewirtschaftung des Wärmespeichers sind im Kapitel 7.5 zu finden.

13.5.6 Brennstoffbedarf Holz

Der jährliche Brennstoffbedarf für Holz (t/Jahr oder Srm/Jahr) wird aus dem jährlichen Primärenergiebedarf (z. B. in MWh/a) und dem spezifischen Energieinhalt des Brennstoffs (z. B. in MWh/t) berechnet.

Bei monovalenter Wärmeerzeugung entspricht der jährliche Primärenergiebedarf für Holz dem Jahreswärmebedarf der Gesamtanlage, dividiert durch den Jahresnutzungsgrad η_a der Holzkesselanlage.

Bei bivalenter Wärmeerzeugung ist zur Ermittlung des Primärenergiebedarfs für Holz nur der Anteil des Jahreswärmebedarfs relevant, der mit den Holzkesseln abgedeckt wird (biogener Anteil an der Jahreswärmeproduktion). Dies hängt von der getroffenen Leistungsaufteilung und der Jahresdauerlinie der Gesamtanlage ab und entspricht in der Regel 80 bis 90 % des Jahreswärmebedarfs der Gesamtanlage. Durch Division dieses Anteils durch den Jahresnutzungsgrad η_a der Holzkesselanlage ergibt sich der jährliche Primärenergiebedarf für Holz. In der Excel-Tabelle Situationserfassung wird dies in der Arbeitsmappe «*Bilder* oder *Q-Plan Tabelle»* ausgewiesen.

Die **Verluste der Wärmeerzeugung** Q_{VWE} werden aus dem Jahresnutzungsgrad der Wärmeerzeugung η_a berechnet. Die Bestimmung des Jahresnutzungsgrads bei Holzfeuerungen ist in Kapitel 20.12 beschrieben. Die Verluste der Wärmeerzeugung Q_{VWE} werden beeinflusst durch:

- Betriebsverluste respektive Kesselwirkungsgrad
- Bereitschaftsverluste
- Auslastung
- Gemittelte Laststufe.

13.6 Weitere Varianten des Wärmeerzeugungssystems

13.6.1 Mehrkesselanlagen mit Standard-Seriengeräten

Kostengünstige Holzkessel als Standard-Seriengeräte bis zu einer Kesselnennleistung von üblicherweise etwa 500 kW, mit Ausnahmen bis 1'500 kW, ermöglichen als monovalente Mehrkesselanlagen («Kaskadenanlagen», zum Beispiel 3 bis 6 Holzkessel), den Wärmeleistungsbedarf eines Holzheizwerks bis etwa 2 MW und grösser abzudecken.

In Verbindung mit einem Wärmespeicher, der eine optimale Leistungsvorgabe und optimale Kaskadenregelung mit automatischem Zu- und Wegschalten (mit automatischer Zündung) der einzelnen Holzkessel ermöglicht, können die einzelnen Holzkessel fortlaufend über das ganze Jahr, speziell bei Schwachlastbetrieb in der Übergangszeit und im Sommer (siehe Tabelle 13.4), mit hoher Auslastung und geringen Bereitschaftsverlusten betrieben werden. Dies ermöglicht einen hohen Gesamt-Jahresnutzungsgrad η_a.

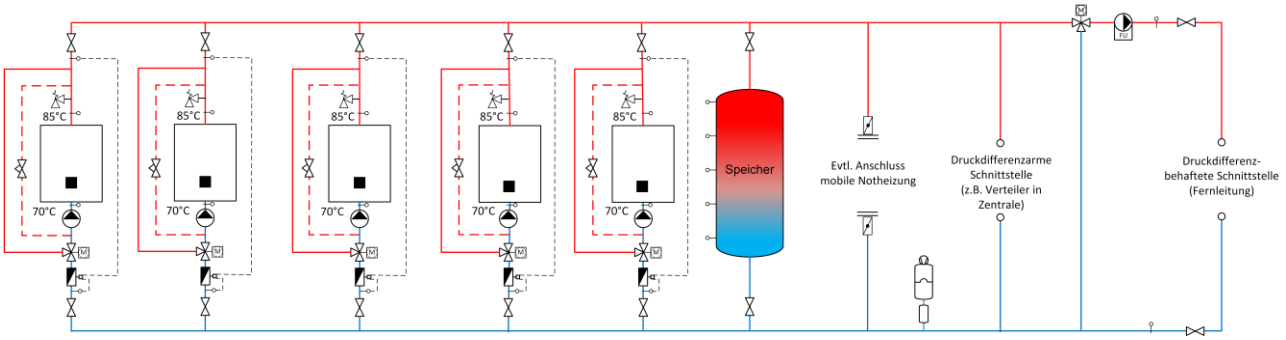


Bild 13.12 Prinzipschema einer Mehrkesselanlage («Kaskadenanlage») mit Standard-Seriengeräten.

Zu beachten ist, dass Holzkessel als Standard-Seriengeräte mit Festrostfeuerung und Unterschubfeuerung nach einer vorgegebenen Betriebszeit von beispielsweise 6 bis 8 Betriebsstunden ein automatisches **Entaschungs- und Reinigungsintervall** des Festrostes (mit Kipprosten) oder des Drehrostes durchführen. Dabei wird der Brennstoff auf dem Rost in der Ausbrandphase vollständig zu Asche abgebrannt. Anschliessend erfolgt die mechanische Reinigung des Rostes, bevor der Holzkessel mit der automatischen Zündung erneut gestartet wird. Das Reinigungsintervall beträgt rund 30 bis 45 Minuten.

Während des Reinigungsintervalls eines Holzkessels ist zu verhindern, dass ein anderer Holzkessel zur Überbrückung des Reinigungsvorgangs mit Kaltstart in Betrieb genommen wird, um wieder ausgeschaltet zu werden, sobald der gereinigte Kessel wieder in der stationären Betriebsphase ist.

Beim Ausfall eines Holzkessels ergibt sich mit den restlichen Holzkesseln eine hohe Versorgungssicherheit (Redundanz).

Mehrkesselanlagen mit Standard-Seriengeräten ergeben eine hohe Flexibilität beim Ausbau eines Wärmenetzes, da bereits im Grundausbau die erforderliche Auslastung der einzelnen Holzkessel im Schwachlastbetrieb ermöglicht wird.

Anforderungen an den **Brennstoff** (siehe Kapitel 13.4):

- Pellets
- Qualitäts-Hackschnitzel WS- und IS-P16S-M20* sowie WS- und IS-P31S-M20
- WS- und IS-P31S-M35 (ab Kesselleistung > 200 kW mit Vorschubrostfeuerung)

Die erforderliche hohe Brennstoffqualität erhöht die Betriebskosten durch den höheren Brennstoffpreis erheblich. Dies wirkt sich speziell auf die Wirtschaftlichkeit von Mehrkesselanlagen mit einer hohen Gesamt-Kesselnennleistung aus.

Auslegungsgrundsätze

Jahreswärmeproduktion mit Holz	100 %
Auslegung	Gesamtkesselleistung ohne Lastspitzen (schwarzer Rhombus in Bild 13.4) kleinster Kessel nach Tabelle 13.4, weitere Kessel auf problemlose Kesselumschaltung auslegen (z. B. 1/5 zu 2/5 zu 2/5)
Vollbetriebsstundenzahl Holzkessel	> 2'000 h/a
Schwachlastbetrieb	Einhaltung Tabelle 13.4 mit kleinstem Kessel
Automatische Zündung?	Ja, für kleinen Kessel (< 500 kW)
Brennstoff	Pellets, Qualitäts-Hackschnitzel WS- und IS-P16S-M20* sowie WS- und IS-P31S-M20 oder WS- und IS-P31S-M35 (ab Kesselleistung > 200 kW mit Vorschubrostfeuerung)
Speicherkapazität	≥ 1 h bezogen auf 2/3 der Gesamtnennleistung der Holzkessel (empfohlen jedoch ≥ 1 h bei 100 % Gesamtnennleistung).

13.6.2 Zusatz-Holzkessel mit hoher Brennstoffqualität für Sommerbetrieb

Bei geringem Wärmebedarf in der Übergangszeit oder im Sommer wird bei einer monovalenten Anlage mit zwei Holzkesseln mitunter die notwendige Auslastung (die minimale mittlere geforderte Tagesheizlast bei Schwachlastbetrieb entsprechend Tabelle 13.4) für den oder die grösseren Holzkessel nicht erreicht, da diese aufgrund der Grösse und der typischerweise eingesetzten Referenzbrennstoffe eine höhere Minimallastanforderung haben.

Um hier mehr Flexibilität bei der Auslegung und dem Betrieb von Anlagen zu haben, kann ein Zusatz-Holzkessel (Sommerkessel) mit kleiner Leistung eine sinnvolle Ergänzung darstellen, um den Sommer- oder Schwachlastbetrieb flexibel und effizient abdecken zu können (siehe Bild 13.13). Hier kommen in der Regel Seriengeräte zum Einsatz, die für den Betrieb mit hoher Brennstoffqualität ausgelegt sind (Pellets oder Qualitäts-Hackschnitzel) und über eine automatische Zündung verfügen. Sie stellen eine sinnvolle Alternative gegenüber fossilen Kesseln sowie Bioöl- und Biogaskesseln dar, um eine 100 %ig CO_2-neutrale Wärmeerzeugung zu ermöglichen.

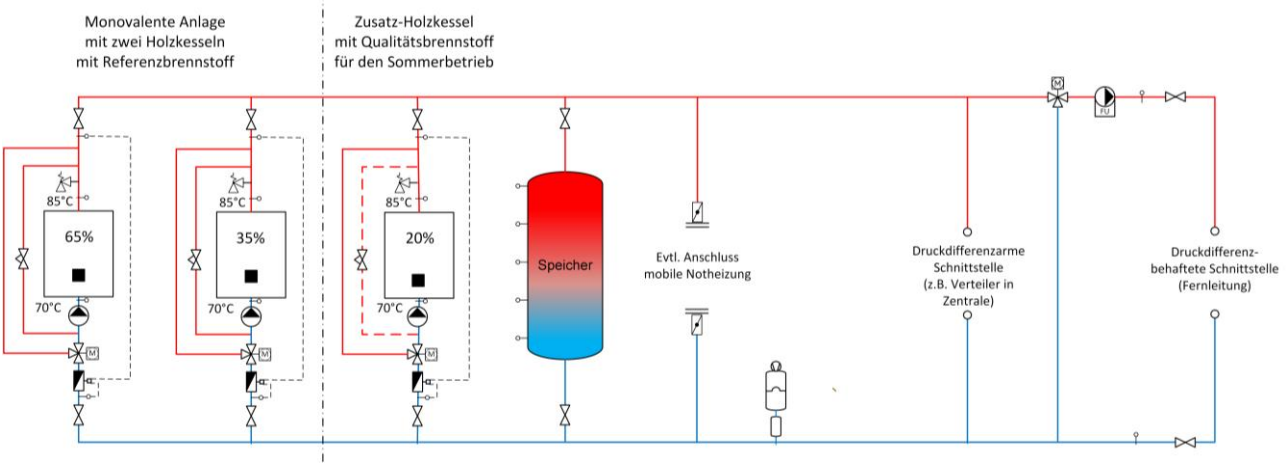


Bild 13.13 Prinzipschema einer monovalenten Anlage mit zwei Holzkesseln sowie mit einem Zusatz-Holzkessel mit Qualitätsbrennstoff für den Sommerbetrieb.

Ziel der Auslegung des Zusatz-Holzkessels ist eine optimale Auslastung des Holzkessels bei der Wärmeproduktion für die Warmwasserversorgung im Sommer.

Dazu sollte die Kesselleistung beziehungsweise die Gesamtkesselleistung eines oder mehrerer Zusatz-Holzkessel im Minimum auf die zweifache maximale mittlere geforderte Tagesheizlast im Sommerbetrieb dimensioniert sein. Bei einem System mit nur einem grossen Holzkessel und einem Zusatz-Holzkessel sollte eventuell auf die dreifache maximale mittlere geforderte Tagesheizlast im Sommerbetrieb dimensioniert werden. Dies unter der Annahme, dass eine Speicherkapazität vorhanden ist, um den Tageslastverlauf so auszugleichen, dass der Zusatz-Holzkessel im Sommerbetrieb der mittleren Tageslast nachfahren kann. Diese ermöglicht es, mit dem Zusatz-Holzkessel auch den Übergangsbereich abzudecken (siehe Bild 13.5), in dem dann auch schon der grössere Holzkessel zum Einsatz kommen könnte.

Für Seriengeräte sind spezielle Anforderungen an den **Brennstoff** wie bei Mehrkesselanlagen mit Standard-Seriengeräten zu berücksichtigen (siehe Kapitel 13.6.1).

Gibt es keine getrennte Brennstofflagerung und -versorgung, muss sichergestellt sein, dass das Brennstofflager bei Betriebsbeginn des Zusatz-Holzkessels den erforderlichen qualitativ hochwertigen Brennstoff enthält. Bei einer Störung in der Brennstoffversorgung kann keiner der Kessel betrieben werden.

Bei einer getrennten Brennstofflagerung und -versorgung kann der Zusatz-Holzkessel auch gleichzeitig mit den anderen Kesseln betrieben werden und als Spitzenlastabdeckung und zur Redundanz beziehungsweise zur Erhöhung der Versorgungssicherheit bei einer Störung eingesetzt werden.

Beim Einsatz von Pellets für den Zusatzkessel ist jedenfalls ein zusätzliches Pelletlager zu erstellen, z. B. ein Gewebesilo.

Ist eine zentrale Solarthermieanlage vorhanden, bieten Zusatz-Holzkessel mit automatischer Zündung und hoher Flexibilität die Möglichkeit der Ausfallsreserve für die Solarthermieanlage. Allerdings stellt sich die Frage der Sinnhaftigkeit und Wirtschaftlichkeit eines Zusatz-Holzkessels, da die Wärmeproduktion und somit die Auslastung des Zusatz-Holzkessels stark beschränkt ist. Die erforderliche Auslastung des Zusatz-Holzkessels gemäss Tabelle 13.4 kann nicht jederzeit gewährleistet werden. Deshalb sind solche Betriebsphasen möglichst gering zu halten (siehe Kapitel 13.7.4.2). Wenn der Zusatz-Holzkessel zugeschaltet wird, soll er jeweils eine lange kontinuierliche Betriebszeit von > 8 Stunden bei minimaler Kesselleistung aufweisen. Der Speicher soll dabei nur teilweise geladen werden, damit die Solarthermieanlage am Folgetag wieder maximal genutzt werden kann.

13.6.3 Wärme-Kraft-Kopplung

Für eine zukunftsgerichtete, effiziente energetische Nutzung des Potenzials an Energieholz ist auch die Installation von Wärme-Kraft-Kopplungs-Anlagen (WKK-Anlagen) zu prüfen. In Deutschland und Österreich wird der Begriff Kraft-Wärme-Kopplung verwendet. Im Folgenden wird jedoch der Schweizer Begriff der Wärme-Kraft-Kopplung verwendet.

Bei der Produktion von Strom aus Biomasse ist in Hinblick auf die Ressourceneffizienz immer auch die anfallende Wärme zu nutzen. Ansonsten ist die Verwendung von Biomasse für die Stromproduktion nicht zu empfehlen. Der Modulationsbereich dieser Anlagen ist relativ klein, sodass sie in der Regel immer mit Nennleistung betrieben werden sollten und somit Bandenergie liefern. Folgende Verfahren bieten sich dafür an:

- Dampfturbine
- Dampfmotor
- Organic Rankine Cycle (ORC)
- Gasmotor
- Heissgasturbine

Im Planungshandbuch Fernwärme werden die einzelnen Verfahren ausführlicher beschrieben (siehe [19] in Kapitel 2.9).

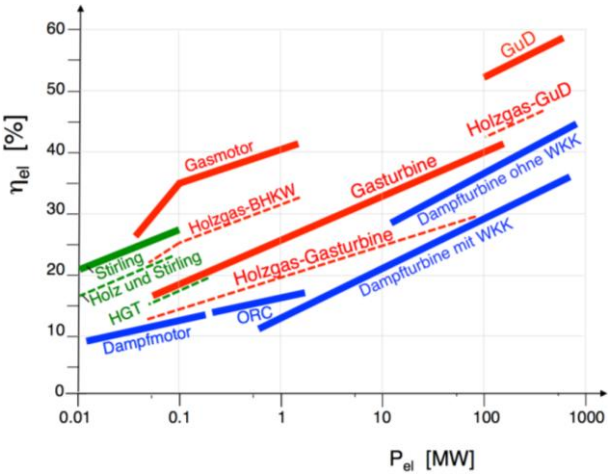


Bild 13.14 Elektrische Netto-Wirkungsgrade verschiedener Technologien zur Stromerzeugung in Funktion der elektrischen Leistung [19]. GuD = Gas- und Dampf-Kombikraftwerk, HGT = Heissgasturbine (mit Holzverbrennung).

Bild 13.14 zeigt, dass die Technologien zur Wärme-Kraft-Kopplung einen Bereich von wenigen kW bis über 1 GW elektrischer Leistung abdecken. Die erzielbaren elektrischen Netto-Wirkungsgrade umfassen eine Bandbreite von weniger als 10 % bis zu 60 %. Bei den etablierten Verfahren der Dampfkrafttechnologie zeigen die elektrischen Wirkungsgrade eine ausgeprägte Skalenabhängigkeit von weniger als 10 % für Leistungen ab 10 kW_{el} bis zu rund 45 % bei Grossanlagen. Andere Technologien wie die Holzvergasung und der Stirlingmotor erzielen höhere elektrische Wirkungsgrade im kleinen und mittleren Leistungsbereich. Die Stromproduktion mit Biomasse ist von Witterung und Jahreszeit unabhängig und für den Grundlastbetrieb und die Stromnetzstabilisierung geeignet.

Bei der Holzvergasung ist auf eine hohe Brennstoffqualität zu achten. In der Regel wird ein homogener und getrockneter Brennstoff wie beispielsweise Qualitäts-Hackschnitzel WS/IS-P16S/P31S-M10 benötigt. Abhängig vom Anlagenhersteller, Bauart und Technologie sowie der Grösse der Anlage ist das einsetzbare Brennstoffsortiment im Einzelfall abzuklären. Neben der Strom- und Wärmeproduktion ist bei der Holzvergasung auch die Produktion von Holzkohle möglich.

WKK-Anlagen mit Holz weisen als Orientierungswerte folgende Stromgestehungskosten auf:

- Dampfprozess mit Dampfkessel und Dampfturbine: 10 – 20 ct./kWh (15 – 30 Rp/kWh)
- ORC-Prozess mit Thermoölkessel und ORC-Modul: 15 – 25 ct./kWh (20 – 35 Rp/kWh)
- Holzvergasungsprozess mit Gasmotor: 15 – 30 ct./kWh (25 – 40 Rp/kWh)

Die Wirtschaftlichkeit ist gemäss den Marktvoraussetzungen (erzielbare Einspeisetarife/Eigenstromabdeckung vs. Stromgestehungskosten) und technischen Rahmenbedingungen (Teillastbetriebsfähigkeit, Auslastung, wärmegeführter Betrieb/Gesamtanlageneffizienz usw.) im Detail zu prüfen und die erzielbaren Stromgestehungskosten gegebenenfalls denen von anderen erneuerbaren Stromquellen gegenüberzustellen.

13.7 Ergänzende Wärmequellen und Wärmeerzeugungssysteme

13.7.1 Allgemeine Bemerkungen

Die Forderung an eine zukünftige CO_2-neutrale Wärmeerzeugung im Zuge der Wärmewende ist eine Herausforderung, die es anzunehmen gilt. Für die Spitzenlast- und Schwachlastdeckung sind allenfalls Zusatzoptionen zu den Grundvarianten der Wärmeerzeugungssysteme mit Holzfeuerungsanlage (Kapitel 13.5.1) erforderlich. Eine weitere Möglichkeit ist die Einbindung dezentraler Bestandskessel, sofern vorhanden. In Abhängigkeit der erforderlichen Infrastruktur, Mess- und Regelungstechnik ist im Einzelfall zu prüfen, ob bereits bestehende Erzeuger (z. B. Pellet- oder Gaskessel, BHKW) in ein geplantes Netz eingebunden werden können.

Eine fossile Spitzenlastabdeckung kann die Forderung bezüglich Dekarbonisierung nicht erfüllen. Die Wärmeerzeugung für Wärmenetze (thermische Netze) sollte in Zukunft daher vermehrt mit mehreren erneuerbaren Energieträgern erfolgen.

Ergänzende Wärmequellen können sein:

- Abwärme aus den Abgasen der Holzfeuerungsanlage für direkte und indirekte Nutzung mit Wärmepumpe
- Abwärme von Kälteanlagen für direkte und indirekte Nutzung mit Wärmepumpe
- Abwärme aus Abwasser und Abwasserreinigungsanlagen (ARA) für indirekte Nutzung mit Wärmepumpe
- Abwärme aus industriellen Prozessen für direkte und indirekte Nutzung mit Wärmepumpe
- Umgebungswärme aus bodennahen Luftschichten, Oberflächengewässern und oberflächennaher Geothermie für indirekte Nutzung mit Wärmepumpe
- Geothermie bis etwa 500 Meter Tiefe sowie Geothermie in grösseren Tiefen für direkte oder indirekte Nutzung mit Wärmepumpe inklusive Grundwassernutzung

Ergänzende Wärmeerzeugungssysteme sind:

- Wärmepumpen
- Solarthermieanlagen
- Biogas-/Bioölkessel
- Biogas-/Bioöl-BHKW (Blockheizkraftwerke)

Das Zusammenspiel der Holzfeuerungsanlage mit den ergänzenden Wärmequellen und Wärmeerzeugungssystemen wird durch die Verfügbarkeit der Wärmequelle respektive des Wärmeerzeugungssystems bestimmt.

Die Forderungen bezüglich der minimalen mittleren Tagesheizlast bei Schwachlastbetrieb gemäss Tabelle 13.4 und der jährlichen Auslastung der Holzkessel (Vollbetriebsstundenzahl) bestimmen das Einsatzgebiet, bei welchem die Holzfeuerungsanlage energieeffizient und emissionsarm betrieben werden kann.

Folgende Zielsetzungen sind bei der Kombination einer Holzfeuerungsanlage mit ergänzenden Wärmequellen oder ergänzenden Wärmeerzeugungssystemen zu beachten:

- Substitution von fossilen Energieträgern für eine CO_2-neutrale Wärmeproduktion
- Effiziente energetische Nutzung des Potenzials an Energieholz. Das begrenzte Potenzial ist optimal zu nutzen.
- Substitution von Energieholz respektive trockener Biomasse durch weitere erneuerbare Energieträger, wo möglich und sinnvoll. Das Potenzial der erneuerbaren Energieträger ist zu erweitern, und diese sind optimal einzusetzen.
- Vermeiden von «Konkurrenzsituationen» der unterschiedlichen erneuerbaren Energieträger – kombinieren statt konkurrieren!

Für die erfolgreiche Umsetzung der aufgeführten ergänzenden Wärmequellen und Wärmeerzeugungssysteme sind immer auch die Grundanforderungen der gewählten Technologien zu berücksichtigen. So benötigen einige Technologien zur Effizienzsteigerung tiefe Rücklauftemperaturen im Wärmenetz mit einem Zielwert von 40 °C oder tiefere Vorlauftemperaturen im Wärmenetz mit Zielwert von 70 °C.

Mit Zusatzoptionen ist bei der Auslegung der Kesselleistungen der Holzfeuerungsanlage zu beachten, dass die Holzkessel bei der geforderten minimalen Auslastung gemäss Tabelle 13.4 betrieben werden müssen. Durch die Verwendung der Zusatzoptionen kann sich die Vollbetriebsstundenzahl der Holzkessel reduzieren, sodass die in Tabelle 13.5 geforderten Werte nicht mehr eingehalten werden können.

Die Auslegung und der Betrieb der Gesamtanlage sind so zu wählen, dass die in Kapitel 13.3 aufgeführten Grundanforderungen jederzeit eingehalten werden können.

13.7.2 Wärmerückgewinnung aus dem Abgas

13.7.2.1 Allgemeine Bemerkungen

Das Abgas kann nach dem Austritt aus dem Kessel bzw. der Rauchgasreinigung je nach Auslegung und Betriebszustand noch Temperaturen von 120 °C bis > 160 °C und einen dementsprechend hohen Energieinhalt aufweisen. Bild 13.15 zeigt das Steigerungspotenzial des Kesselwirkungsgrades durch den Einsatz von Economisern und Abgaskondensationsanlagen. Dementsprechend sind für eine effiziente energetische Nutzung des Energieholzes die in der Folge beschriebenen Varianten der Wärmerückgewinnung (WRG) aus dem Abgas zu prüfen. Weitere Hinweise sind im Kapitel 5.9 zu finden.

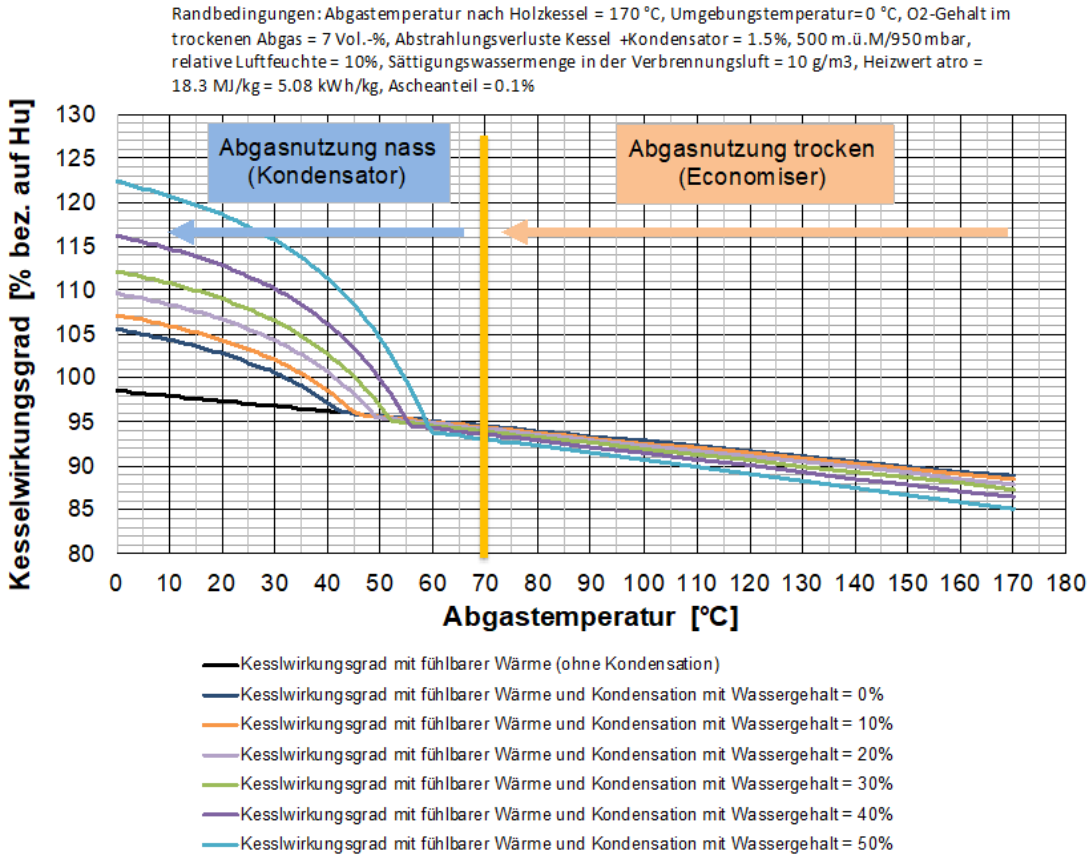


Bild 13.15 Kesselwirkungsgrad in Funktion der Abgastemperatur und des Wassergehalts. Trockene Abgasnutzung mit Economiser, nasse Abgasnutzung mit Abgaskondensation (Quelle: Verenum AG).

13.7.2.2 Economiser

Beim Austritt des Partikelabscheiders weisen die Abgase Temperaturen von 120 °C bei Teillast bis 160 °C bei Kessel-Nennleistung auf. Im Economiser wird die fühlbare (sensible) Wärme zurückgewonnen, indem die Abgase auf etwa 70 °C (rund 15 K über dem Taupunkt) abgekühlt werden. Bei einer hohen jährlichen Kesselauslastung kann ein zusätzlicher WRG-Anteil von 5 bis 7 % der produzierten Wärmemenge des Holzkessels erreicht werden.

Hydraulisch wird der Economiser in der Regel in Serie zum Hauptrücklauf nach dem Speicher (kesselseitig) eingebunden (siehe Bild 13.16 Schema links). Eine hydraulische Einbindung des Economisers parallel zum Holzkessel (siehe Bild 13.16, Schema rechts), also wie ein zusätzlicher Wärmeerzeuger, ist zu prüfen, wenn die Hauptvorlauftemperatur < 85 °C, die Hauptrücklauftemperatur > 65 °C betragen oder das Wärmeträgermedium des Holzkessels (z. B. Thermoöl, Dampf oder Heisswasser) > 110 °C ist, und die erzeugte Wärme des Economisers auf ein Warmwassersystem übertragen werden kann.

Weitere Hinweise sind in Kapitel 5.4 und in Kapitel 5.9 zu finden.

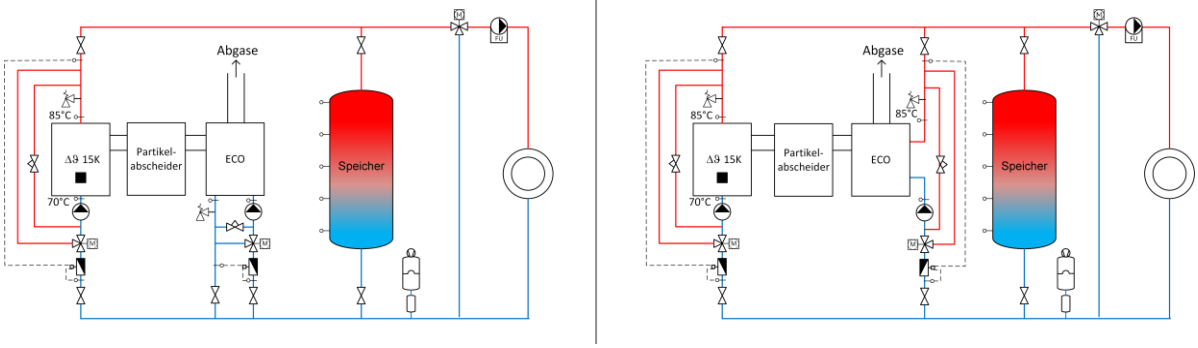


Bild 13.16 Prinzipschema einer Anlage mit der Einbindung eines Economisers in Serie im Rücklauf (links) oder parallel (rechts).

13.7.2.3 Abgaskondensation

In der Abgaskondensationsanlage wird mit der fühlbaren (sensiblen) Wärme auch die latente Wärme im Abgas zurückgewonnen. Die Abgase werden deutlich unter den Taupunkt abgekühlt, um eine maximale Wärmerückgewinnung zu erzielen.

Um einen WRG-Anteil > 10 % respektive einen Zielwert > 15 % erreichen zu können, sind folgende Rahmenbedingungen einzuhalten:

- Tiefe Rücklauftemperatur des Heizsystems
- Luftüberschuss λ in der stationären Betriebsphase über den gesamten Leistungsbereich des Kessels 30 % bis 100 %: < 1.5feucht
- Abgasrezirkulation und optimale Auslastung der Holzkesselanlage erforderlich (Vollbetriebsstunden > 3'000 h/a, wenig Start- und Ausbrandphasen).
- Mittlerer Wassergehalt Brennstoff mindestens M40
- Grädigkeit des Wärmeübertragers zwischen Abgastemperatur Austritt und Rücklauftemperatur Heizsystem < 4 K im Auslegefall bei maximaler WRG-Leistung und < 2 K über die gesamte Betriebszeit.

Die **Rücklauftemperatur** bestimmt den Wärmerückgewinnungsanteil. **Pro Kelvin, um** welches das Abgas unter den Taupunkt abgekühlt werden kann, **erhöht** sich der Wärmerückgewinnungsanteil **um 1 %.**

Tabelle 13.7 Grundanforderungen für den effizienten Betrieb einer Abgaskondensationsanlage.

Mittlerer Wassergehalt	Brennstoffsortiment	Rücklauftemperatur
M40	Holzhackschnitzel aus Waldrestholz	< 45 °C
M40	Holzhackschnitzel aus Waldrestholz (> 1'000 kW Nennwärmeleistung Kessel)	< 50 °C*
M50	Industrierestholz eines Sägewerkes	< 50 °C

* mit Verbrennungsluftbefeuchtung

Als Grundvariante wird die Abgaskondensationsanlage hydraulisch in Serie in den Hauptrücklauf eingebunden (siehe Bild 13.17). Um die tiefstmögliche Rücklauftemperatur sicherzustellen, ist der Volumenstrom für die Kondensation vor dem Speicher abzunehmen. Zur Sicherstellung des Volumenstroms über die Kondensation hat die Rückgabe zwischen Speicher und Kessel zu erfolgen. Aufgrund der Gleichzeitigkeit von Kessel und Kondensation kann so die Funktion der Hydraulik ohne Überströmen gewährleistet werden.

Es ist auch möglich, die Kondensation in den Hauptrücklauf zwischen Speicher und Kessel einzubauen (siehe Bild 13.18). Bei geringem Volumenstrom im Hauptrücklauf ist der Volumenstrom im Kreislauf der Abgaskondensationsanlage durch die Reduktion der Pumpenleistung so zu reduzieren, dass ein Überströmen des Vorlaufs der Abgaskondensationsanlage in den Eintritt der Abgaskondensationsanlage ausgeschlossen werden kann. Der Einbau eines Rückschlagventils oder einer Rückschlagklappe bildet eine zusätzliche Massnahme, um das unerwünschte Überströmen zu verhindern.

In Ausnahmefällen, z. B. bei einer Netztrennung zwischen Wärmeerzeugung und Wärmenetz oder bei einem Strang mit tiefen Rücklauftemperaturen, kann die Abgaskondensation in den netzseitigen Rücklauf eingebunden werden (siehe Bild 13.19). In diesem Fall sind die Gleichzeitigkeit der Wärmeproduktion der Abgaskondensationsanlage mit dem Wärmebedarf im Netz und die entsprechenden Massenströme im Rücklauf zu berücksichtigen.

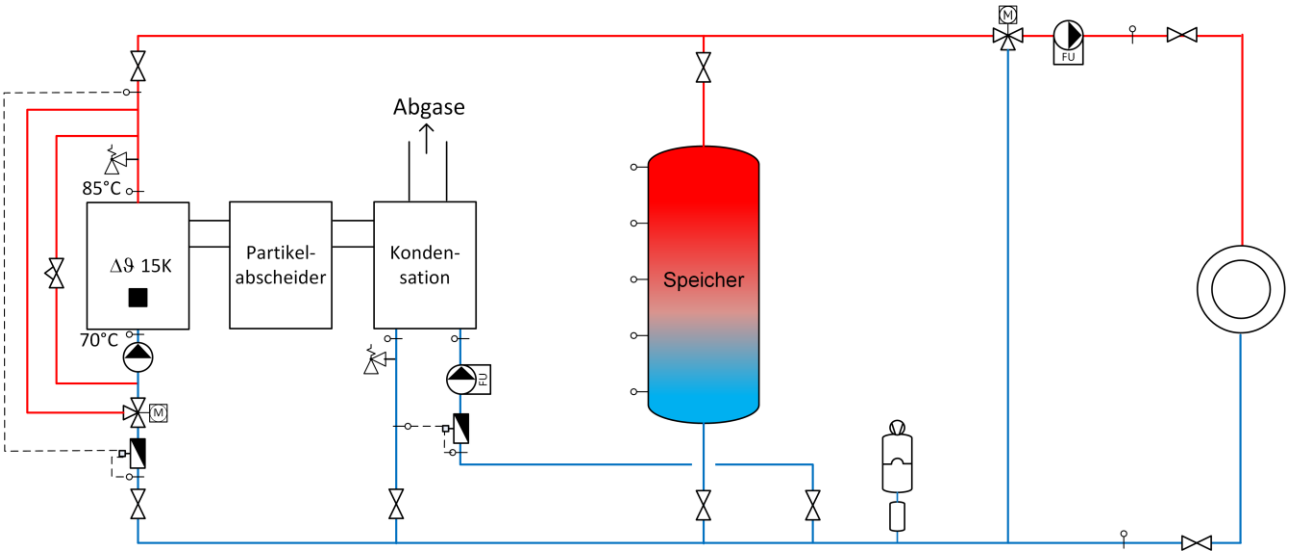


Bild 13.17 Prinzipschema einer Anlage mit Einbindung der Abgaskondensation in den Hauptrücklauf: Abgaskondensations-Eintritt vor dem Speicher, Abgaskondensations-Austritt zwischen Speicher und Kessel.

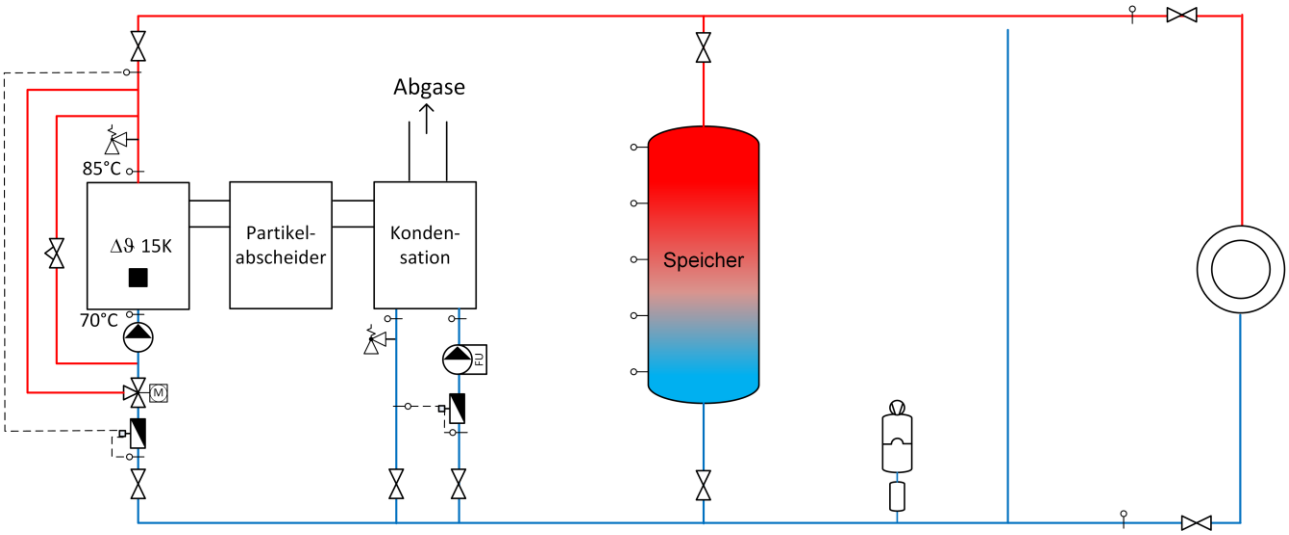


Bild 13.18 Prinzipschema einer Anlage mit Einbindung der Abgaskondensation in den Hauptrücklauf: Abgaskondensations-Eintritt und Abgaskondensations-Austritt zwischen Speicher und Kessel.

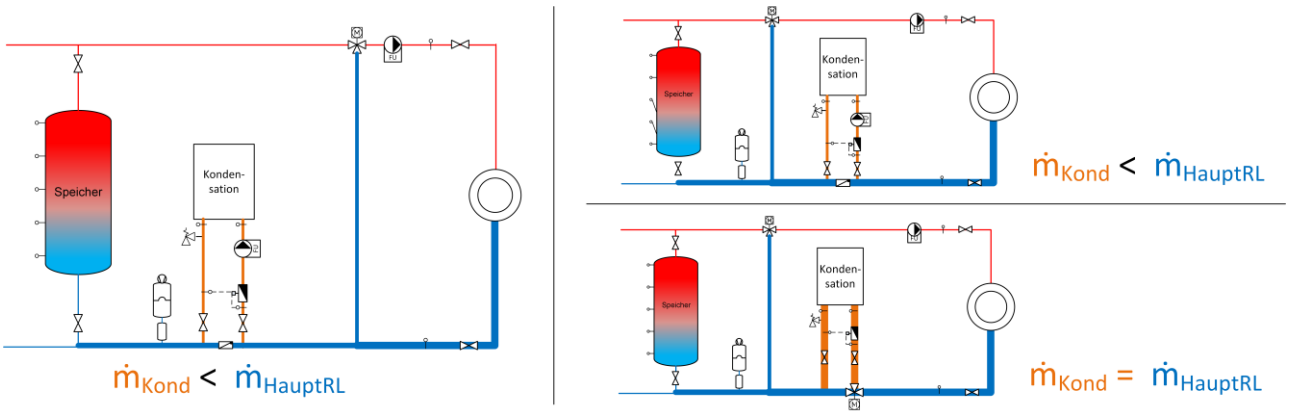


Bild 13.19 Prinzipschema mit Einbindung der Abgaskondensation in den Hauptrücklauf vor dem Speicher.

13.7.2.4 Wärmerückgewinnung mit Abgaskondensation für ein Niedertemperaturnetz

Sofern Wärmeverbraucher mit tiefen Rücklauftemperaturen und auch tiefen Temperaturanforderungen über ein separates Niedertemperaturnetz erschlossen werden können, kann die Versorgung des Niedertemperaturnetzes nur mit Abwärme aus der Abgaskondensation erfolgen (Bild 13.20). Durch das niedrige Temperaturniveau kann eine signifikant höhere Wärmeausbeute aus der Abgaskondensation erreicht werden.

Hinweis: Zur Spitzenlastdeckung oder aus hygienischen Gründen kann ein zeitweises Anheben der Netztemperaturen mit Wärme aus der Primäranlage erforderlich sein. Aufgrund der im Regelbetrieb markant tieferen Abgastemperatur und der im Fall einer Störung der Abgaskondensation wieder erhöhten Abgastemperatur ist der Dimensionierung des Kaminquerschnitts (siehe Kapitel 13.10.4.2) und der Betriebsweise im Störungsfall besondere Beachtung zu schenken.

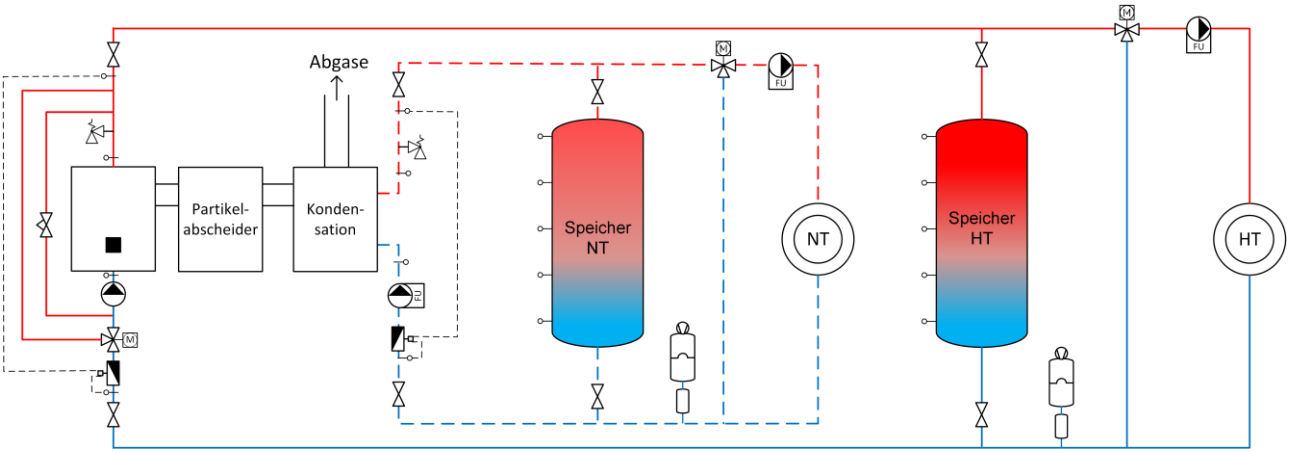


Bild 13.20 Prinzipschema Einbindung Abgaskondensation in ein Niedertemperaturnetz.

13.7.3 Wärmepumpen

13.7.3.1 Allgemeine Informationen

Eine Wärmepumpe entzieht einer Wärmequelle mit tieferem Temperaturniveau Wärme, um diese Wärme auf ein höheres Temperaturniveau anzuheben. Die Wärme auf höherem Temperaturniveau lässt sich zu Heizzwecken nutzen. Das Arbeitsprinzip des Wärmepumpen-Kreisprozesses sowie die Definition der entsprechenden Kennzahlen wird als bekannt vorausgesetzt.

Die **Effizienz** einer Wärmepumpenanlage ist mit der Leistungszahl **COP** (coefficient of performance) und der Jahresarbeitszahl **JAZ** definiert.

Der **Gütegrad** zeigt auf, wie die Leistungszahl COP der realen Maschine von der Leistungszahl COP des idealen Carnot-Kreisprozesses abweicht.

Grundanforderungen an eine Wärmepumpenanlage sind:

- Das Kältemittel (Arbeitsmedium) der Wärmepumpe hat eine hohe Umweltverträglichkeit bezüglich Ozonabbau ODP («Ozone Depletion Potential») und Treibhauseffekt GWP («Global Warming Potential») aufzuweisen.
- Das Kältemittel muss für den gesamten Temperatureinsatzbereich geeignet sein.
- Die Ausführung der Wärmepumpe muss der Auslastung des Gerätes entsprechen. Eine Wärmepumpe mit 8'000 Vollbetriebsstunden pro Jahr muss im Industriebaustandard realisiert sein.
- Die gesetzlichen Anforderungen an den Bau einer Wärmepumpenanlage sind zu beachten. Alle relevanten Normen und Richtlinien sind einzuhalten (zugelassene Kältemittel, Schallemissionen, Gefahrenpotenzial, Lüftung Aufstellungsraum, Gaswarnung usw.).

13.7.3.2 Energetische Effizienz einer Wärmepumpenanlage

Die Wärmepumpenanlage ist mit einer hohen Leistungszahl COP respektive einer hohen Jahresarbeitszahl JAZ zu betreiben. Bei der Auslegung der Anlage sind folgende Punkte zu berücksichtigen:

- Betrieb bei kleinstmöglichem Temperaturhub. Die erzeugte Wärme soll auf tiefstmöglichem Temperaturniveau genutzt werden. Dabei ist die optimale Nutzung der Heissgasabwärme bezüglich des möglichen Temperaturhubs zu beachten.
- Wärmepumpe mit hohem COP respektive hohem Gütegrad auswählen (siehe Bild 13.22 und Bild 13.23).
- Dauerbetrieb der Anlage im optimalen Betriebspunkt bei variabler Wärmeleistungsabgabe mit wenigen Start-/Stopp-Phasen, um den Verschleiss zu reduzieren. Zu diesem Zweck können mehrere Wärmepumpen, drehzahlgeregelte Wärmepumpen oder eine Kombination beider Varianten eingesetzt werden.

- Hydraulische Einbindung der Wärmepumpenanlage für die Temperaturanhebung des Hauptrücklaufs:
  - Die Hauptrücklauftemperatur des Wärmenetzes ist konstant auf tiefstmöglichem Temperaturniveau zu halten.
  - Die Wärmeeinspeisung der Wärmepumpenanlage für die Rücklauftemperatur-Anhebung hat entsprechend der kleinstmöglichen Temperaturdifferenz in Abhängigkeit der Übertragungsleistung im variablen Volumenstrom des Wärmepumpenkreislaufs zu erfolgen.
  - Bei folgenden Betriebszuständen hat die Wärmeeinspeisung der Wärmepumpenanlage in einen Speicher zu erfolgen, welcher seriell in den Hauptrücklauf eingebunden ist (siehe Bild 13.21 links), oder in den unteren Teil des Speichers, welcher parallel zu den Wärmeerzeugern eingebunden ist (siehe Bild 13.21 rechts):
    - Der Wärmeproduktionsverlauf der Wärmepumpenanlage ist nicht identisch mit dem Verlauf der Lastabnahme im Wärmenetz:

      1-stufige Wärmepumpe
    - Der Wärmeanfall der Wärmequelle (z. B. Abgaskondensationsanlage, Kältemaschine) ist zeitversetzt zur Lastabnahme im Wärmenetz. Kurzfristig können hohe Lastschwankungen im Wärmenetz auftreten.

      Diese hydraulische Einbindung ermöglicht eine konstant tiefe Rücklauftemperatur im Wärmepumpenkreislauf trotz unterschiedlichen Lastverlaufs des Wärmenetzes in Bezug auf den Wärmeproduktionsverlauf der Wärmepumpe.

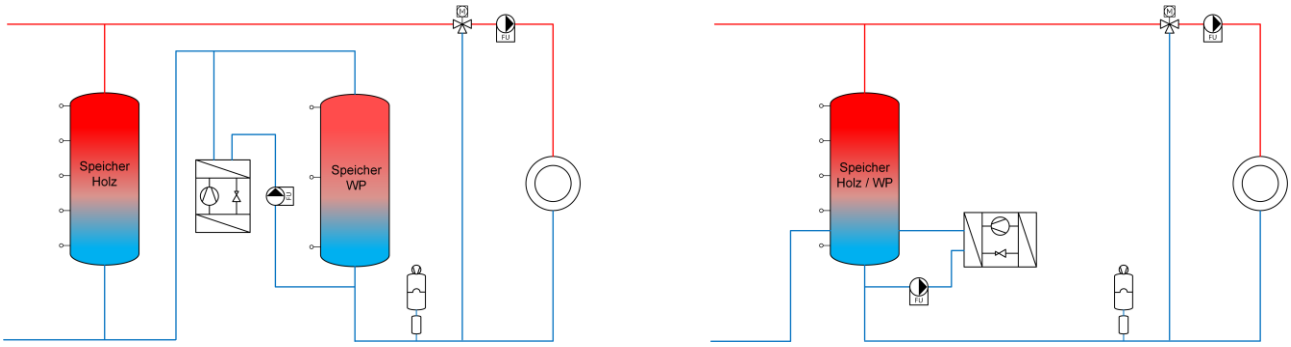


Bild 13.21 Prinzipschema zur Einbindung von Wärmepumpen.

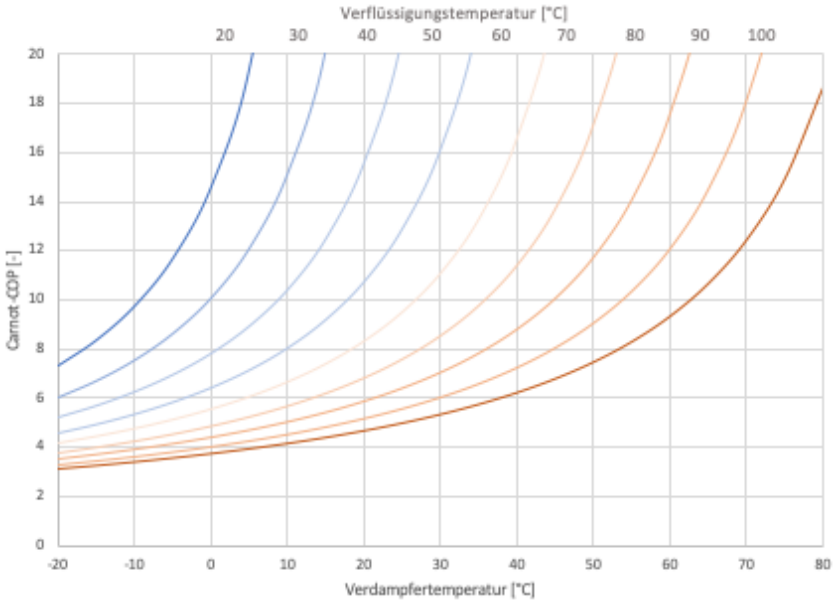


Bild 13.22 COP des Carnot-Prozesses. Das Diagramm basiert auf einem Gütegrad von 1 einer idealen Maschine respektive Wärmepumpe. Wärmepumpen weisen im Realbetrieb einen Gütegrad von 0.4 bis 0.6 auf.

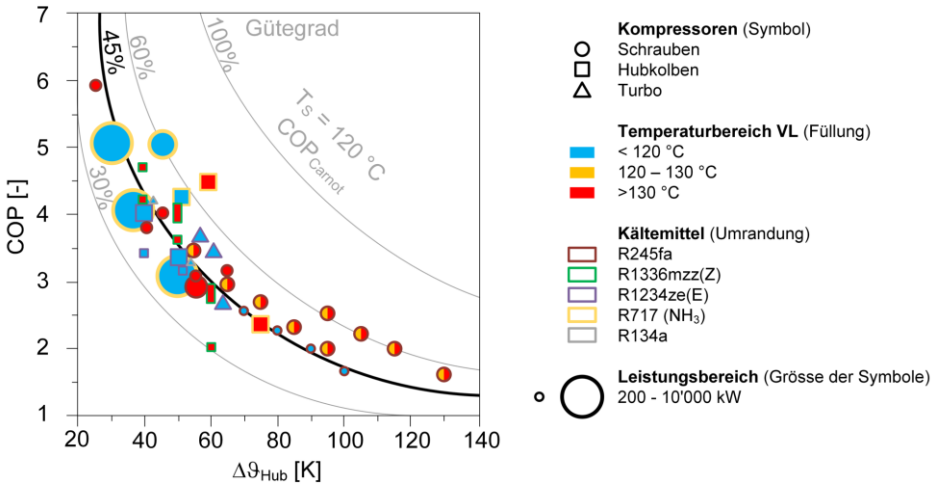


Bild 13.23 Gütegrad und COP realer Maschinen in Abhängigkeit des äusseren Temperaturhubs, der Temperaturdifferenz zwischen Senkenaustritts- und Quelleneintrittstemperatur (selbst gezeichnet auf Basis von [135]).

Für den wirtschaftlichen und energieeffizienten Betrieb einer Wärmepumpenanlage für ein Wärmenetz mit Holzheizwerk ist ein Zielwert der **Jahresarbeitszahl JAZ > 4** zu beachten. Die Jahresarbeitszahl JAZ respektive die Leistungszahl COP steht in einem direkten Verhältnis zum Temperaturhub, welchen die Wärmepumpenanlage zu erbringen hat (siehe Bild 13.22). Stand der Technik industrieller Wärmepumpenanlagen ist:

- Temperaturhub 30 K, COP 6 bis 7*
- Temperaturhub 40 K, COP 4 bis 5*
- Temperaturhub 60 K, COP 3 bis 4*
  (z. B. 15 °C bis 75 °C)

  *Wärmepumpen mit hohem Gütegrad

Bei der Wahl des **Kältemittels** ist auf einen ODP-Wert von 0 und einen niedrigen GWP-Wert zu achten (siehe Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung, ChemRRV [136]). Es sind möglichst natürliche Kältemittel zu berücksichtigen.

13.7.3.3 Hydraulische Einbindung einer Wärmepumpenanlage für den Sommerbetrieb

Entspricht die Vorlauftemperatur der Wärmepumpe im Sommerbetrieb bei einer Wärmeerzeugung nur mit Wärmepumpenanlage der Vorlauftemperatur der Fernleitung, so erfolgt die Wärmeeinspeisung der Wärmepumpe in den Speicher der Holzkesselanlage (siehe Bild 13.24). Beim gemeinsamen Betrieb der Wärmepumpenanlage mit der Holzfeuerungsanlage erfolgt die Wärmeeinspeisung der Wärmepumpe in den Hauptrücklauf vor dem Speicher oder in den unteren Teil des Speichers zur Anhebung der Rücklauftemperatur.

Hinweis: Grundsätzlich sind immer die QM-Grundanforderungen einzuhalten!

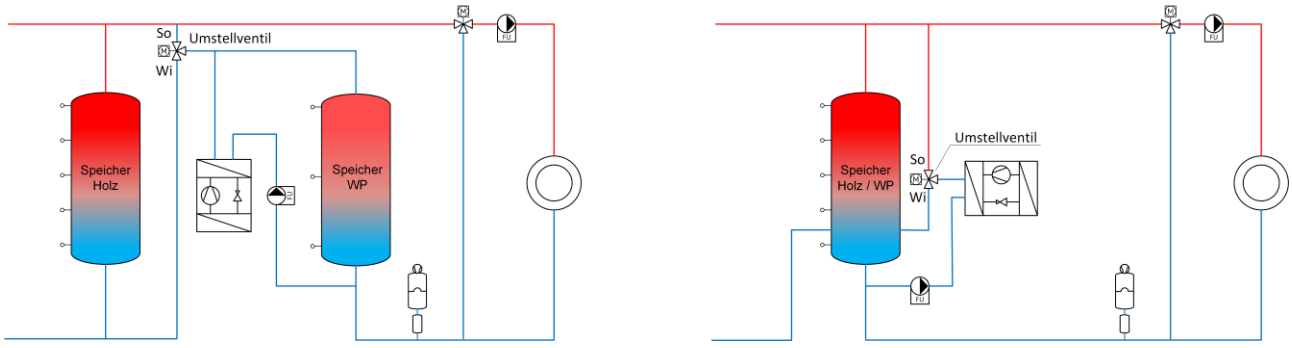


Bild 13.24 Prinzipschema zur Einbindung einer Wärmepumpe für den Sommerbetrieb.

13.7.3.4 Wärmepumpe in Kombination mit Abgaskondensation

Der WRG-Anteil der Abgaskondensation kann bis auf 30 % erhöht werden, wenn die Abgase nach dem Abkühlen mit der Hauptrücklauftemperatur des Wärmenetzes zusätzlich bis auf < 30 °C abgekühlt werden.

Die Wärmepumpenanlage ist hydraulisch so einzubauen, dass die produzierte Wärme in Serie in den Hauptrücklauf eingespeist wird (siehe Bild 13.25). Damit wird ein hoher COP erreicht. Dieser wird umso grösser, je kleiner der Temperaturhub ist.

Damit der Temperaturhub der Wärmepumpenanlage geringgehalten werden kann, ist auf eine tiefe Hauptrücklauftemperatur zu achten. Wobei zu beachten ist, dass bereits der direkte Teil der Wärmerückgewinnung durch die Abgaskondensationsanlage zu einer Anhebung des Hauptrücklaufs führt.

Der Economiser ist hydraulisch in den Hauptrücklauf nach der Temperaturanhebung durch die Wärmepumpenanlage einzubinden.

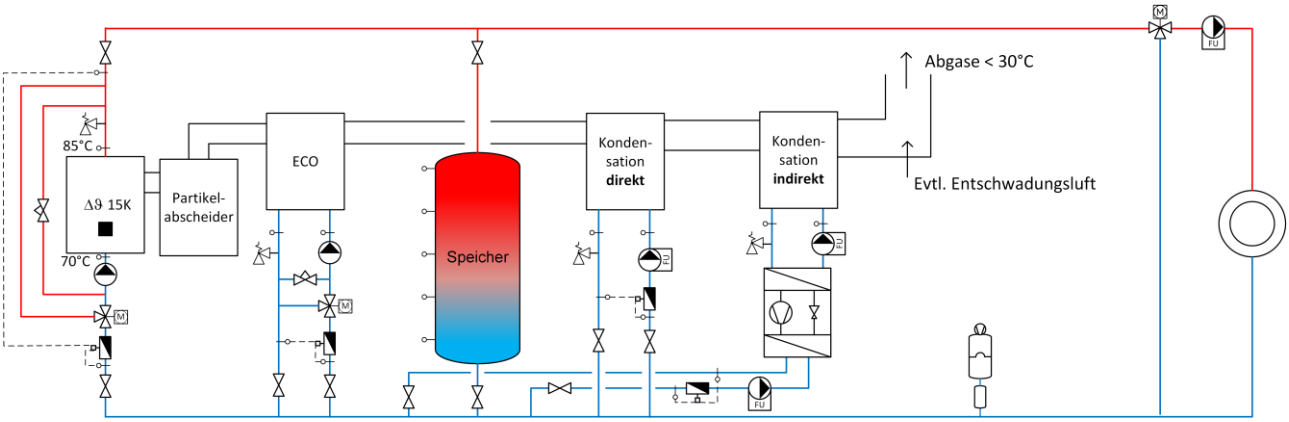


Bild 13.25 Prinzipschema Einbindung Wärmepumpe in die Abgaskondensation.

Beim Einsatz von **Kompressionswärmepumpen** ist ein COP > 4 anzustreben und die Anlage so zu konzipieren, dass sie trotz schwankender Abgasvolumenströme durch die Modulierung der Kesselleistung bei konstant optimalen Betriebsbedingungen betrieben werden können. Dies kann beispielsweise durch den Einsatz mehrerer Kompressionswärmepumpen, einer drehzahlgeregelten Wärmepumpe mit drehzahlgeregelten Pumpen für den Kreislauf der Wärmequelle und den Nutzwärme-Kreislauf oder mit der Kombination der beiden Möglichkeiten erreicht werden. Die zusätzliche Wärmeleistung, welche die Wärmepumpenanlage durch die Nutzung der Abgaskondensationsanlage gewinnt, erhöht die Gesamt-Wärmeleistung der Wärmeerzeugung erheblich. Bei der Wahl der Wärmepumpe ist darauf zu achten, dass diese sowohl für einen geringen Temperaturhub als auch für eine relativ hohe Quellentemperatur geeignet ist.

Absorptionswärmepumpen werden mit einem Heisswasserkessel im Temperaturbereich von 150 °C betrieben. Rund 30 % der Heisswasserkesselleistung des Holzkessels (der Holzkessel) wird für die Antriebswärme der Absorptionswärmepumpe benötigt. Als Option kann die Gesamtkesselleistung der Holzkessel auf 70 % Warmwasserkesselleistung und 30 % Heisswasserkesselleistung bei gemeinsamer Abgaskondensationsanlage aufgeteilt werden. Das Heisswasser (30 % des Gesamt-Volumenstroms des Kesselkreislaufes) wird in der Absorptionswärmepumpe von ca. 150 °C auf ca. 130 °C abgekühlt. Beträgt die Vorlauf- bzw. Rücklauftemperatur für das Anheben der Hauptrücklauftemperatur 80 °C bzw. 55 °C auf der Kondensatorseite und ist die Abgastemperatur nach der Abgaskondensation < 30 °C, so ergibt sich ein COP von etwa 1.7 (Bild 13.26).

Dabei kann die Brennstoffeffizienz durch Abgaskondensation bei einem Wassergehalt des Brennstoffs von M50 um ca. 20 % erhöht werden. Der Zusatzertrag des Economisers ist nicht mitberücksichtigt.

Das Einsatzgebiet von Absorptionswärmepumpen für WRG mit Abgaskondensation liegt bei Holzheizwerken mit einem Gesamt-Wärmeleistungsbedarf > 5 MW. Idealerweise benötigt ein Teil der Wärmeabnehmer (maximal ca. 50 %) auch Heisswasser, wie es bei Molkereien, Wäschereien und anderen Prozesswärmebezügern der Fall ist.

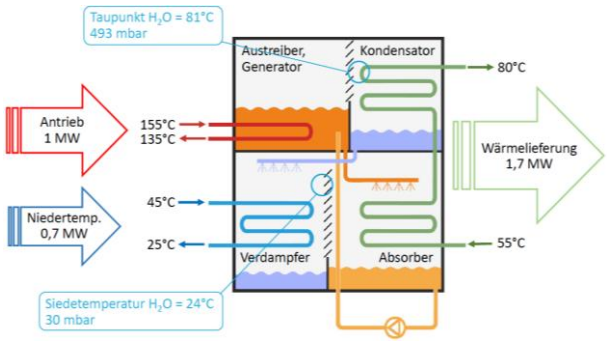


Bild 13.26 Absorptionswärmepumpe (LiBr, einstufig; Quelle: STEPSAHEAD).

Das Einsatzgebiet von **Rotations-Wärmepumpen** für die Wärmerückgewinnung mit Abgaskondensation liegt bei Holzheizwerken mit einem Gesamt-Wärmeleistungsbedarf > 5 MW.

Vorteile von Rotations-Wärmepumpen sind:

- Kein problematisches Kältemittel
  ODP = 0, GWP = 0, unbrennbar, ungiftig (Edelgas)
- Breites Einsatzgebiet von -20 °C bis 150 °C mit ein und derselben Maschine und demselben Arbeitsmittel
- Temperaturen und Leistungen sehr flexibel regelbar
- Vorteile bei Hochtemperaturanwendungen
  < 100 °C.

Nachteile von Rotations-Wärmepumpen sind:

- mässiger COP
- hohe Kosten
- hoher Platzbedarf.

13.7.3.5 Wärmerückgewinnung mit Abgaskondensation für kalte Fernwärme

Das Einspeisen der Wärme der Abgaskondensationsanlage in ein Netz mit einer Vorlauftemperatur von ungefähr 15 °C ermöglicht das Abkühlen der Abgase auf < 20 °C und damit einen hohen WRG-Anteil der Abgaskondensation. Die Verteilung der Wärme erfolgt als kalte Fernwärme und wird durch dezentrale Wärmepumpen (JAZ > 4) auf die Solltemperatur angehoben. Dies erlaubt eine hohe, effiziente energetische Nutzung des Energieholzes.

13.7.4 Solarenergie

13.7.4.1 Zielsetzungen

Zielsetzungen der Nutzung von Solarenergie in Verbindung mit dem Betrieb eines Holzheizwerkes werden nachfolgend aufgelistet:

- Effiziente direkte Sonnenenergienutzung ermöglicht es in den Monaten mit hoher Sonneneinstrahlung, den Bedarf an Energieholz zu reduzieren. Die Holzenergie soll in den Monaten mit geringer Sonneneinstrahlung genutzt werden.
- Vermeidung des Betriebs eines Holzkessels im Sommer mit ungenügender Auslastung im Schwachlastbetrieb.
- Reduktion des Einsatzes von fossilen Energieträgern (Heizöl, Gas) im Sommer bei ungenügender Auslastung des Holzkessels im Schwachlastbetrieb.

13.7.4.2 Solarthermieanlagen für Wärmenetze

Eine Solarthermieanlage für ein Wärmenetz wird auf der Basis der mittleren Sommerlast, das heisst der mittleren Tagesheizlast des Wärmenetzes im Sommer als witterungsunabhängiger Wärmeleistungsbedarf gemäss Bild 13.27 ausgelegt. Die hydraulische Einbindung der Solarthermieanlage ins Wärmenetz kann zentral oder dezentral erfolgen.

Mit einem thermischen Sonnenkollektorfeld, welches entsprechend der mittleren Tagesheizlast des Wärmenetzes im Sommer dimensioniert ist, kann der Wärmebedarf im Sommer zu 100 % und in der Übergangszeit zu einem Teil abgedeckt werden. Die Holzkesselanlage wird erst zu Beginn der Heizsaison in Betrieb genommen.

Verhindert eine eingeschränkte Kollektorfeldfläche eine 100 %ige Sommerdeckung, so hat die erforderliche Restabdeckung durch einen Holzkessel mit hoher Brennstoffqualität oder als Alternative mit einem Heizkessel, welcher idealerweise mit Bioöl oder Biogas betrieben wird, zu erfolgen (siehe Kapitel 13.6.2).

Verschiedene Beispiele und Möglichkeiten zur Integration von Solaranlagen sind auf der Webseite von Solar District Heating oder Euroheat & Power zu finden (https://www.solar-district-heating.eu und https://www.euroheat.org/).

Die folgende empirische Formel unter Berücksichtigung der Werte in Tabelle 13.8 ermöglicht eine grobe Abschätzung der notwendigen Gesamtkollektorfläche. Die detaillierte Auslegung der Gesamtkollektorfläche hat unter Berücksichtigung der effektiven Rahmenbedingungen zu erfolgen. Einfach anwendbare Tools, welche kostenlos verfügbar sind, erleichtern die Dimensionierung (z. B. www.scfw.de).

Kollektorfläche = Faktor Kollektorfläche [$m^2/kW_{Sommerbedarf}$] x mittlere Tagesheizlast Sommerbedarf [$kW_{Sommerbedarf}$]

Tabelle 13.8 Abschätzung der Kollektorfläche und des Speichervolumens für verschiedene solare Deckungsgrade auf Basis zehn realisierter Anlagen in D, A, CH.

Faktor Kollektorfläche [$m^2/kW_{Sommerbedarf}$]	**Speichervolumen** [$l/m^2_{Kollektor}$]	**Jahresdeckung*** [%]	**Sommerdeckung** [%]
20	100	ca. 20	100
4	200	ca. 6	40
2	300	ca. 3	20

*Annahme Jahres-Wärmebedarf Warmwasser 25 % des Gesamtwärmebedarfs respektive Wärmebedarf ausserhalb der Heizperiode (Sommer) rund 10 % des Jahres-Wärmebedarfs (Wärmebedarf Warmwasser plus Wärmeverlust Fernleitung). Je höher der Anteil des Jahres-Wärmebedarfs Warmwasser, umso höher ist die mögliche Jahresdeckung.

Mit der Annahme eines jährlichen Kollektorertrags von 400 bis 500 kWh/m^2 ergeben sich folgende Grössenordnungen:

- Bei etwa 20 m^2/kW Kollektorfläche und einem Speichervolumen von rund 100 Litern/m^2 Kollektorfläche kann ein solarer Deckungsgrad bis etwa 20 % bezüglich des jährlichen Gesamtwärmebedarfs des Wärmenetzes erreicht werden. Im Sommer kann der solare Deckungsgrad in diesem Fall beinahe 100 % betragen.

- Bei ungefähr 4 m²/kW Kollektorfläche und einem Speichervolumen von 200 Litern/m² Kollektorfläche kann ein solarer Deckungsgrad von bis zu 6 % bezüglich des jährlichen Gesamtwärmebedarfs des Wärmenetzes erreicht werden.
- Bei 2 m²/kW Kollektorfläche und einem Speichervolumen von 300 Litern/m² Kollektorfläche beträgt der solare Deckungsgrad bis zu 3 % bezüglich des jährlichen Gesamtwärmebedarfs des Wärmenetzes.

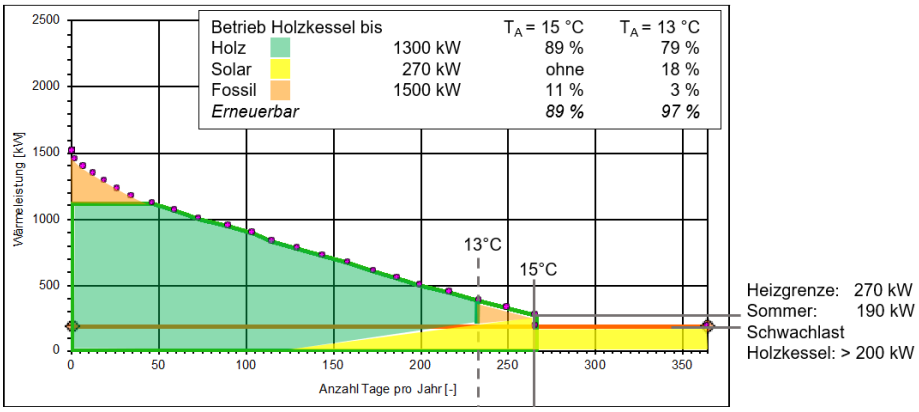


Bild 13.27 Jahresdauerlinie eines Holzheizwerks mit einem Holzkessel, einem fossilen Heizkessel und einer Solarthermieanlage.

Voraussetzung für eine energetisch sinnvolle Einbindung einer Solarthermieanlage in das Netz eines Holzheizwerks zur Reduktion des Holzenergiebedarfs respektive der Reduktion des Bedarfs an fossilen Energieträgern ist, dass die Holzfeuerungsanlage mit einem hohen Gesamtjahresnutzungsgrad $\eta_a > 90$ % betrieben werden kann. Dies erfordert eine optimale Auslastung der Holzkessel, verbunden mit einer energieeffizienten Wärmerückgewinnung aus den Abgasen.

- Der zusätzliche Wärmeertrag aus der Installation eines Economisers beträgt rund 6 % der Wärmeproduktion des Holzkessels. Dies entspricht dem Ertrag einer Solarthermieanlage mit 4 m2 Sonnenkollektorfläche pro kW mittlerer Tagesheizlast im Sommer und einem solaren Jahresdeckungsgrad von bis zu 6 %.
- Der zusätzliche Wärmeertrag aus der Installation einer Abgaskondensationsanlage beträgt rund 15 bis 20 % der Wärmeproduktion des Holzkessels. Dies entspricht dem Ertrag einer Solarthermieanlage mit 20 m2 Sonnenkollektorfläche pro kW mittlerer Tagesheizlast im Sommer und einem solaren Deckungsgrad von bis zu 20 %.

Hinweis: Kann die Solarthermieanlage nicht den gesamten Sommerbedarf decken, wird die Auslastung des im Betrieb stehenden Holzkessels durch den Wärmeertrag der Solarthermieanlage beträchtlich eingeschränkt. Ist die Auslastung bedeutend geringer als die minimale mittlere geforderte Tagesheizlast für den Holzkessel gemäss Tabelle 13.4, so hat dies eine starke Reduktion des Jahresnutzungsgrads η_a des im Betrieb stehenden Holzkessels zur Folge. Die Kombination einer Solarthermieanlage mit einem Holzkessel zur Abdeckung des Wärmebedarfs im Sommer kann unter diesen Umständen bezüglich der Energieeffizienz einen ungünstigen Effekt haben.

Die **Auslastung des Holzkessels** wird auch in der Übergangszeit durch den Wärmeertrag der Solarthermieanlage bedeutend verringert. In der Jahresdauerlinie von Bild 13.27 ist diese Problematik ersichtlich. Mit einem solaren Deckungsgrad im Sommer von beinahe 100 % (z. B. Substitution des fossilen Energieträgers im Sommer) ergibt sich in der Übergangszeit durch den Wärmeertrag der Solarthermieanlage eine bedeutend reduzierte Last für den Holzkessel. Bei der Systemwahl «ein Holzkessel mit Speicher (monovalent oder bivalent)» ergibt sich ein ungünstiger Betrieb des Holzkessels in der Übergangszeit mit reduziertem Jahresnutzungsgrad η_a durch die zu geringe Auslastung, welche bedeutend unter der minimalen mittleren geforderten Tagesheizlast für den Holzkessel liegt.

Mit einem Zusatz-Holzkessel mit kleiner Leistung für den Betrieb mit hoher Brennstoffqualität (z. B. mit Pellets oder Qualitäts-Hackschnitzeln) im Sommer und eventuell in der Übergangszeit lässt sich die Problematik der ungenügenden Auslastung des Holzkessels durch den Wärmeertrag der Solarthermieanlage verhindern (siehe Kapitel 13.6.2).

Daher sind für einen optimalen Betrieb der Holzfeuerungsanlage in der Übergangszeit mit der erforderlichen Auslastung bei zusätzlichem Wärmeertrag der Solarthermieanlage folgende Systemwahl-Varianten zu prüfen: 2 Holzkessel (Aufteilung Kesselleistung 1 zu 2) oder Mehrkesselanlage mit Speicher.

Das gemeinsame Speichervolumen ist wie folgt zu nutzen:

- Im Sommer wird der Wärmeertrag der Solarthermieanlage und die Wärmeproduktion der Holzkesselanlage in den Hauptvorlauf eingespeist.
- In der Übergangszeit wird der Wärmeertrag der Solarthermieanlage in das unterste Drittel des Speichers für das Anheben des Hauptrücklaufes eingespeist. Die oberen zwei Drittel des Speichers werden gemäss Standard-Schaltung QM Holzheizwerke durch die Holzkesselanlage bewirtschaftet.
- Ergänzende Hinweise sind in der FAQ 32 «Wie sollen Sonnenkollektoren eingebunden werden?» aufgeführt.

13.7.4.3 Dezentrale Solarthermieanlage beim Wärmeabnehmer

Bei einer Anschlussdichte im Wärmenetz von < 1 MWh/(a*m) ist zu prüfen, ob die Warmwasseraufbereitung im Sommer dezentral bei den Wärmeabnehmern mit thermischen Sonnenkollektoranlagen erfolgen kann, da während dieser Zeit die Wärmeverluste des Wärmenetzes bedeutend höher sind als der Wärmebedarf der Warmwasseraufbereitung.

Das Wärmenetz wird bei dieser Variante nur während der Heizperiode betrieben. Die Wärmeverluste des Wärmenetzes im Sommer entfallen und müssen nicht durch eine zentrale Solarthermieanlage mit entsprechendem Strombedarf für die Pumpen der Solarthermieanlage und des Wärmenetzes abgedeckt werden.

Die Auslegung der Solarthermieanlage erfolgt entsprechend dem Warmwasserbezug jedes Wärmebezügers. Möglich wäre die Warmwasserbereitung beim Kunden im Sommer auch mit einer Wärmepumpe (Wärmepumpenboiler in Kombination mit Photovoltaikanlage).

13.7.4.4 Photovoltaik mit Wärmepumpe

Der Wärmebedarf eines Wärmenetzes kann im Sommer vollständig durch eine Wärmepumpe gedeckt werden. Wird der Strom für die Wärmepumpe mit einer Photovoltaikanlage (PV-Anlage) erzeugt, ist auch diese Wärmeproduktion erneuerbar. Die Wärmepumpe kann zudem im Winter zusätzlich für die Spitzenlastdeckung oder in die Abgaskondensation eingebunden werden.

Eine Photovoltaikmodulfläche von insgesamt 5 bis 7 m^2 pro kW mittlerer Tagesheizlast im Sommerbedarf ergibt eine jährliche Stromproduktion, welche dem Strombedarf der Wärmepumpe für das Abdecken des Wärmebedarfs im Sommer entspricht.

Die Photovoltaikmodulfläche kann auch auf mehrere bestehende Dachflächen angeordnet werden.

Es lassen sich folgende Annahmen treffen:

- Wärmebedarf Sommer: 10 % des jährlichen Gesamtwärmebedarfs
- Wärmequelle Aussenluft im Mittel > 15 °C, Vorlauftemperatur Wärmenetz 70 °C
- Jahresarbeitszahl (JAZ) der Wärmepumpe > 3 (bis 4 bei Wärmepumpe mit hohem Gütegrad).

Im Unterschied zur Solarthermie kann die Wärmepumpe am Beginn der Übergangszeit ausgeschaltet werden, um den Holzkessel in Betrieb zu nehmen. Damit kann der Holzkessel in der Übergangszeit mit der erforderlichen Auslastung und ohne Einbussen des Jahresnutzungsgrades betrieben werden (siehe Kapitel 13.7.4.2). Nicht direkt genutzter PV-Strom kann ins Netz eingespeist werden.

Bei der Systemwahl «ein Holzkessel mit Speicher monovalent» ist die Wärmepumpe grösser auszulegen. Das Zu- und Wegschalten der Wärmepumpe ermöglicht es, die indirekte Sonnenenergienutzung mit der Photovoltaikanlage unter Berücksichtigung der erforderlichen Auslastung des Holzkessels flexibler zu gestalten. Die Sonnenenergienutzung und die Wärmeproduktion werden zeitlich getrennt.

Die Wärmepumpe kann ausserdem zur Wärmerückgewinnung mit Abgaskondensation genutzt werden.

13.7.5 Abwärmenutzung

13.7.5.1 Vorbemerkungen

Als Abwärme werden Wärmeströme bezeichnet, die als Nebenprodukt von Prozessen anfallen und ungenutzt sowie oft mit zusätzlichem Energieaufwand für Pumpen, Ventilatoren, Rückkühler oder Kälteanlagen an die Umgebung abgegeben werden und zu unerwünschter Erwärmung beitragen. Als Abwärmenutzung (Wärmerückgewinnung) werden Massnahmen bezeichnet, welche diese Abwärme für andere Prozesse oder Zwecke nutzen und so die Energieeffizienz erhöhen.

Im Unterschied zur Wärme aus einem Wärmeerzeuger fällt Abwärme nicht bedarfsbezogen, sondern prozessbedingt an. Qualitative (Temperatur) und quantitative (Wärmemenge) Schwankungen des Abwärmeangebotes aufgrund von saisonalen Bedingungen, Arbeitszeiten oder Prozessabläufen und anderen Gründen sowie zeitliche Verschiebungen zwischen Abwärmeangebot und Wärmebedarf sind bei der Auslegung der Anlagen und insbesondere der Wärmespeicher zu berücksichtigen. In der Excel-Tabelle Situationserfassung von QM Holzheizwerke kann die Abwärmenutzung unter «Maximale mittlere Bandquellen-Tagesleistung» bei der Auslegung der Anlage mitberücksichtigt werden.

Hinweis: Industriebetriebe arbeiten in der Regel ein- bis zweischichtig von Montag bis Freitag und produzieren über Weihnachten und Neujahr nicht. Es kann deshalb sein, dass Abwärme aus Industriebetrieben für die Raumheizung in dieser Zeit nicht verfügbar ist.

13.7.5.2 Direkte Abwärmenutzung

Abwärmequellen > 80 °C

Wärme von Abwärmequellen > 80 °C (z. B. Abwärme von BHKW-Anlagen, tiefe Geothermie) liegt in der Regel auf demselben Temperaturniveau wie die Holzheizung und kann parallel zur Holzkesselanlage direkt in den Hauptvorlauf respektive in den Wärmespeicher eingebunden werden.

Bei der Einbindung von Abwärmequellen mit relativ kleiner Leistung und demzufolge geringem Massenstrom ist zu beachten, dass der Durchfluss der Wärmeverbraucher diesem Massenstrom angepasst sein sollte. Sonst besteht die Gefahr, dass die Temperatur im Vorlauf der Abwärmenutzung durch den hohen Massenstrom abgemischt und der Wärmespeicher von unten geladen wird.

Abwärmequellen > 60 °C

Bei Wärmequellen > 60 °C (industrielle Abwärme, Druckluftabwärme, Enthitzerwärme oder mitteltiefe Geothermie) sollte die Wärme direkt in den Hauptrücklauf

des Wärmenetzes eingespeist werden. So wird der Hauptrücklauf angehoben, und es ist weniger Wärme > 80 °C für die Erreichung des Sollwerts des Wärmenetzes beizumischen. In diesem Fall sind jedoch die Gleichzeitigkeit von Abwärmeanfall und Abwärmebedarf der Kunden beziehungsweise des Wärmenetzes sowie die Massenströme des anzuhebenden Hauptrücklaufes mit der Abwärmeleistung abzugleichen. Gegebenenfalls ist ein zusätzlicher Wärmespeicher sinnvoll, um zeitliche Verschiebungen von Wärmeanfall zu Wärmebedarf auszugleichen. Wird diese Abwärme direkt in den Wärmespeicher der Holzheizanlage eingespeist, sind die entsprechende Wärmemenge und ihr Einfluss auf die Speichertemperatur bei der Auslegung des Wärmespeichers zu berücksichtigen. Der Energiespeicher muss entsprechend gross dimensioniert werden und es ist sicherzustellen, dass die maximale Rücklauftemperatur aller Komponenten der Wärmeerzeugung eingehalten werden kann.

13.7.5.3 Indirekte Abwärmenutzung mit Wärmepumpe

Abwärmequellen < 50 °C
Abwärme von Wärmequellen mit einer Temperatur, welche geringer als die Hauptrücklauftemperatur der Wärmeverbraucher ist, kann nicht direkt genutzt werden. Wenn keine Wärmesenke für die direkte Abwärmenutzung vorhanden ist, kann diese Abwärme mit Hilfe einer Wärmepumpe auf ein nutzbares Temperaturniveau angehoben und in den Heizkreis eingespeist werden.

Bezüglich der Anwendungsmöglichkeiten, Einsatzgrenzen und Anforderungen an die Auslegung von Wärmepumpen sind die in Kapitel 13.7.3 genannten Grundbedingungen zu beachten.

Folgende zusätzlichen Wärmequellen zur Kondensationsabwärme aus Abgasen können zum Beispiel mit einer Wärmepumpe genutzt werden:

- Abwärme von Kälteanlagen
- Industrieabwärme/Industrieabluft
- ARA-Abwärme (Abwasserreinigungsanlagen)
- Grundwasser (See- oder Flusswasser)
- Oberflächennahe Geothermie (Erdsonden).

Abwärme von Kälteanlagen (20 bis 40 °C)
Die Kondensationstemperatur von Kälteanlagen liegt in der Regel zwischen 30 °C und 40 °C. Dieses Temperaturniveau kann häufig nicht direkt im Wärmeverbund, aber als Quelle für eine Wärmepumpe genutzt werden. Abhängig von Kältemittel und Konstruktion der Anlage kann das Kältemittel direkt in einer zweiten Stufe auf einen höheren Druck verdichtet oder mit einer separaten Anlage auf die nutzbare Temperatur angehoben werden.

Je nach Verwendungszweck der Kälteanwendung variiert der Wärmeanfall saisonal. Wird mehrheitlich Klimakälte erzeugt, kann die Wärmepumpe gut für die Deckung des Warmwasserbedarfes im Sommer genutzt werden. Im Winter kann die Abgaskondensationsanlage der Holzheizung als Quelle für die Wärmepumpe genutzt werden. Kälteanwendungen, welche ganzjährig relativ stabil laufen, können dementsprechend auch ganzjährig für die Abwärmenutzung eingesetzt werden.

Aufgrund der relativ hohen Quelltemperatur sind bei diesen Anlagen gute COP-Werte und/oder hohe Nutztemperaturen möglich.

Prozessabhängige Industrieabwärme (5 bis 80 °C)
Abwärme von Industrieanlagen kann ganz unterschiedlicher Herkunft sein und fällt auf unterschiedlichen Temperaturniveaus an. Erste Priorität bei der Nutzung von Industrieabwärme sollte immer die direkte Nutzung möglichst nahe beim Erzeuger haben. Eine Analyse aller Prozesse im Betrieb nach der Pinch-Methode hilft Wärmequellen und -senken zu identifizieren und ermöglicht die Erstellung eines «Wärmetauscher-Netzwerkes». Abwärme, welche nicht im eigenen Betrieb genutzt wird, kann an die Heizzentrale abgegeben werden.

Aufgrund der Temperatur ist direkt nutzbare Wärme gemäss Kapitel 13.7.5.2 einzubinden. Abwärme auf tieferem Temperaturniveau kann mit einer Wärmepumpe auf eine nutzbare Temperatur angehoben und in die Anlage eingebunden werden:

- In einem Niedertemperaturnetz kann Abwärme von Maschinen (Turbinenanlage mit Generator, Werkzeugmaschinen usw.), industrielle oder gewerbliche Abwärme und Geothermie z. B. aus Thermalquellen übertragen werden.
- Der Einsatz der Wärmepumpe ist mit dem zeitlichen Anfall der Abwärme abzustimmen respektive mit einem Wärmespeicher auszugleichen.

Abwärme von Abwasserreinigungsanlagen (5 bis 20 °C, saisonal unterschiedlich)
In Abwasserreinigungsanlagen (ARA) fällt ganzjährig Restwärme von 5 °C bis 20 °C an und lässt sich sinnvoll für die Abgaskondensation der Holzkesselanlage nutzen. Eine Vorlauftemperatur der ARA von rund 15 °C ermöglicht das Abkühlen der Abgase auf < 20 °C und damit einen hohen WRG-Anteil. In den Wintermonaten kann das reduzierte Abwärmepotenzial der ARA aufgrund von geringeren Abwassermengen durch tiefere Abwassertemperaturen kompensiert werden.

Die Wärmepumpenanlage wird als Bandlastanlage zur Grundlastabdeckung betrieben. Im Sommer stellt die Wärmepumpe die Vorlauftemperatur der Fernleitung bereit. Während der Heizperiode dient sie zur Anhebung der Hauptrücklauftemperatur.

Die Holzkesselanlage dient zur Deckung der Mittellast sowie bei genügend Speichervolumen auch zur Deckung der Spitzenlast. Die Spitzenlastdeckung kann auch mit Biogas- oder Bioölkesseln erfolgen.

Grundwasser und Oberflächenwasser mit saisonal unterschiedlichen Temperaturen
Dazu gehören folgende Quellen:

- Grundwasser besitzt eine Quellentemperatur von 8 bis 12 °C.

- Die Quellentemperatur von Oberflächenwasser liegt zwischen 5 und 20 °C. Saisonal bestehen relativ starke Unterschiede.

Diese Wärmequellen lassen sich sinnvoll in der Abgaskondensationsanlage der Holzkesselanlage nutzen. Eine Vorlauftemperatur von 15 °C ermöglicht das Abkühlen der Abgase auf < 20 °C und damit einen hohen WRG-Anteil. Das reduzierte Potenzial von Grund- und Oberflächenwasser in den Wintermonaten kann durch tiefere Wassertemperaturen kompensiert werden.

Die Wärmepumpenanlage wird als Bandlastanlage zur Grundlastabdeckung betrieben. Im Sommer stellt sie die Vorlauftemperatur der Fernleitung bereit. Während der Heizperiode dient sie zur Anhebung der Hauptrücklauftemperatur.

Die Holzkesselanlage dient zur Deckung der Mittellast sowie bei genügend Speichervolumen auch zur Deckung der Spitzenlast. Die Spitzenlastdeckung kann auch mit Biogas- oder Bioölkesseln erfolgen.

Aussenluft (- 10 °C bis + 30 °C)
Der reine Sommerbetrieb der Wärmepumpe kann mit Aussenluft mit einer Temperatur von 10 °C bis 30 °C als Wärmequelle erfolgen.

Wärmepumpen mit grösseren Wärmeleistungen benötigen Verdampfer mit einer entsprechend grossen Leistung, die erheblich Platz benötigen. Zudem ist – vor allem im Sommerbetrieb – dem Schallschutz Rechnung zu tragen.

13.8 Bereitstellung von Prozesswärme

Als Prozesswärme wird Wärme bezeichnet, die für einen industriellen Prozess benötigt wird. Im Unterschied zum Raumwärmebedarf ist der Prozesswärmebedarf in der Regel nicht von der Aussentemperatur, sondern direkt vom zu versorgenden Prozess abhängig.

Aufgrund der hohen Temperaturen der Verbrennung eignen sich Holzfeuerungen auch zur Bereitstellung von Prozesswärme bei hohen Temperaturen. Abhängig vom benötigten Temperaturniveau kann die Prozesswärmeerzeugung mit Holz für folgende Medien erfolgen:

- Warmwassersystem < 110 °C
- Heisswassersystem > 110 °C
- Dampf
- Thermoöl
- Heissluft- oder andere Heissgasprozesse

Holzkessel für Dampf, Thermoöl oder Heissluft sind Stand der Technik und verfügbar (siehe auch Kapitel 5.4), werden aber im Vergleich zu Warm- und Heisswasserkesseln nur für WKK- oder Prozesswärmeanlagen eingesetzt. Eine direkte Nutzung des heissen Abgases von Holzfeuerungen für Prozesse (z. B. Trocknung) ist im Gegensatz zum Abgas von Gaskesseln aufgrund der Staubfracht in der Regel nicht möglich. Bei Hochtemperaturanwendungen sind speziell die Sicherheitstechnik, die Trägheit aufgrund der grossen thermischen Masse von Holzfeuerungen sowie die Korrosionsthematik zu beachten. Im vorliegenden Planungshandbuch wird nicht detailliert auf Bauarten, Anlagen- und Sicherheitstechnik eingegangen. Hier sind jedenfalls spezialisierte Hersteller sowie auf diesem Fachgebiet erfahrene Planerinnen und Planer einzubinden.

Lastprofil und Speicherung
Prozesswärmebedarf, welcher als Bandlast anfällt, kann durch eine Holzfeuerungsanlage gut abgedeckt werden, auch wenn das Temperaturniveau hoch ist.
Prozesswärmebedarf mit hohen kurzfristigen Lastschwankungen und ungleichmässigem Tageslastprofil (z. B. keine Wärmeabnahme ausserhalb der Arbeitszeit, wie während der Nacht und am Wochenende) kann kaum monovalent mit einer Holzfeuerungsanlage unter Einhaltung der erforderlichen Auslastung abgedeckt werden. Um den notwendigen Lastausgleich über einen Wärmespeicher zu ermöglichen und auf fossile Heizkessel zu verzichten, ist Folgendes zu beachten:

- Vorab sind Massnahmen zu prüfen und auszuschöpfen, mit denen Lastspitzen durch Anpassung der Produktion so weit wie möglich reduziert werden.
- Der Wärmespeicher und das Speicherlademanagement sind im Anschluss so auszulegen, dass die grössten Lastspitzen, die zum Beispiel am Morgen zum Wochenbeginn anfallen, aus Speicher und Holzfeuerungsanlage zusammen sicher gedeckt werden können. Limitierend sind dabei die maximale Speicherentladeleistung und die maximale Wärmeleistung des Holzkessels. Dabei ist zu berücksichtigen, dass nur bei vorausschauender Planung des Anlagenbetriebs beide Maximalleistungen gleichzeitig nutzbar sind, da der Holzkessel eine gewisse Anfahrzeit benötigt und der Speicher die maximale Entladeleistung nur während beschränkter Zeit abgeben kann.
- Die Produktionsplanung muss allenfalls ins Speichermanagement einfliessen.
- Bei einem reduzierten (Prozess-)Wärmebedarf am Wochenende muss die Speicherauslegung die Wärmeproduktion des Holzkessels bei minimaler Leistung (gemäss Schwachlastbedingung Tabelle 13.4) sicherstellen. Der hohe Speicherladezustand am Montagmorgen kann für die Anfahrspitze genutzt werden.
- Bei Dampf, Thermoöl oder Luft als Wärmeträgermedium ist die Speichermöglichkeit aufgrund verschiedener Faktoren (erreichbare Speicherkapazität, Kosten, Sicherheitsaspekte, …) stark eingeschränkt. In der Regel sind für diese Wärmeträgermedien keine oder nur geringfügige Speicherkapazitäten umsetzbar.

Auslegung
Für die Systemwahl und Auslegung der Wärmeerzeugungsanlage zur Versorgung von Prozesswärmeanlagen ist die Excel-Tabelle Situationserfassung von QM Holzheizwerke teilweise nicht ausreichend. Häufig sind Stundenlastprofile erforderlich, die auf Messungen basieren. Der Witterungseinfluss ist oftmals von untergeordneter Bedeutung, sodass die Auslegung aufgrund

von einigen ausgewählten, typischen Wochenprofilen erfolgen kann. Zudem sind die Temperaturanforderungen der Prozesse für die Anlagenwahl entscheidend.

Mögliche Systemvarianten:

- Grundlastabdeckung (sofern vorhanden) durch Holzfeuerungsanlage mit Wärmespeicher und Spitzenlastabdeckung mit fossilem Gaskessel, welcher in Zukunft mit Biogas betrieben wird, das aus dem Gasnetz bezogen wird und Erdgas-Qualität aufweist.
- Holzvergasungsanlage, welche ein brennbares Holzgas produziert, das als Ersatz für Erdgas in einem Gaskessel genutzt wird. Dabei ist zu beachten, dass der Heizwert deutlich niedriger ist als der von Erdgas und deshalb Anpassungen bei den Gasleitungen und Brennern erforderlich sind. Dazu liegen bis anhin noch kaum praktische Erfahrungen vor. Gleichzeitig setzt der Einsatz zur Prozesswärmeversorgung entweder einen modulierenden Betrieb praktisch im Bereich von 0 % bis 100 % oder einen Gasspeicher voraus. Für diese Variante sind noch kaum kommerzielle Produkte verfügbar und es ist mit hohen Investitionskosten und Betriebskosten (hohe Brennstoffqualität, erhöhter Wartungs- und Instandsetzungsaufwand) zu rechnen. Daneben ermöglichen Holzvergasungsanlagen aber eine zusätzliche Produktion von Holzkohle bzw. «Pflanzenkohle» (als Pflanzenkohle wird aus Biomasse hergestellte Kohle bezeichnet, die nicht energetisch, sondern stofflich genutzt wird).

13.9 Auslegung der Anlagenkomponenten

13.9.1 Auswahl Staubabscheidung

Vorgehen zur Auswahl des Abscheideverfahrens

1. Möglichkeiten prüfen, den Staubgehalt bereits im Rohgas zu senken (Primärmassnahmen, siehe Kapitel 5.7): Brennstoffauswahl, Feuerungskonstruktion, Einstellung von Regelparametern.
2. Bestimmen des notwendigen Abscheidegrades zur Einhaltung der Emissionsanforderungen.
3. Auswahl des geeigneten Abscheideverfahrens für Flugasche und Feinpartikel.

Staubfraktionen

In Hinblick auf umweltrelevante Aspekte sind staubförmige Emissionen bei der Verbrennung von Holz neben den NO_x-Emissionen von grosser Bedeutung. Beurteilt man Staubemissionen aus Holzheizungsanlagen, so muss prinzipiell zwischen zwei Fraktionen unterschieden werden. **Grobe Flugaschen** setzen sich aus Aschepartikeln zusammen, die während der Verbrennung vom Brennstoffbett aufgewirbelt und mit dem Abgas ausgetragen werden. Die Korngrösse dieser Partikel bewegt sich im Bereich zwischen einigen µm und rund 100 µm. Die zweite Fraktion bilden **Feinpartikel**, sogenannte Aerosole, mit Durchmessern deutlich < 1 µm, welche durch Kondensation von anorganischen Substanzen im Holz entstehen, die während der Verbrennung verdampfen.

Gesetzliche Vorgaben

In der Diskussion über Feinstäube wird oft von PM 10 gesprochen. PM 10 steht für «particulate matter < 10 µm» und entspricht der Gesamtmasse von festen und flüssigen Partikeln, sogenannten Aerosolen, die eine Partikelgrösse kleiner 10 µm aufweisen. Die meisten europäischen Länder weisen sowohl Emissions- als auch Immissions-Grenzwerte für PM 10 auf. Da die Grenzwerte der lungengängigen Feinstäube vielerorts erreicht oder überschritten sind, müssen auch die Holzheizungsanlagen einen Beitrag zu ihrer Senkung leisten. Neben der Partikelmasse kann zukünftig auch die gesundheitlich relevantere Partikelanzahl von Bedeutung sein.

Grenzwerte für Gesamtstaub bei Holzfeuerungsanlagen sind länderspezifisch (siehe Tabelle 13.9 und Kapitel 19). Mit der MCP-Directive von 2015 wurden innerhalb der EU neue Emissions-Mindeststandards für Feuerungsanlagen bis 50 MW thermisch bezüglich Staub, Stickoxiden, Kohlenmonoxid und Schwefeldioxid gesetzt, die länderspezifisch umgesetzt wurden. Deutschland beispielsweise hat die MCPD in der 44. BImSchV weitaus strenger umgesetzt.

Für andere Biomassebrennstoffe (Halmgut, Altholz) gelten deutlich strengere Grenzwerte.

Tabelle 13.9 Länderspezifische Feinstaub-Emissionsgrenzwerte in Abhängigkeit der Brennstoff- beziehungsweise Feuerungswärmeleistung; zur besseren Vergleichbarkeit sind die Grenzwerte der einzelnen Länder auf 11 und auf 13 % O2 umgerechnet.

Brennstoffwärmeleistung		Gesamtstaub [mg/m³]	
		bei 11 % O_2	bei 13 % O_2
CH	70 - 500 kW		50
	0.5 - 1 MW		20
	1 - 10 MW	20	
	> 10 MW	10	
DE	< 1 MW	25	20
	1 - 5 MW	23	19
	> 5 MW	13	11
AT	< 1 MW	150	120
	1 - 2 MW	33	27
	> 2 MW	20	16

Staubabscheideverfahren

Folgende Verfahren zur Staubabscheidung, ausführlich beschrieben in Kapitel 5.8.1, stehen zur Verfügung:

- Schwerkraftentstaubung (Absetzkammern)
- Fliehkraftabscheidung (Zyklon, Multizyklon)
- Elektrische Feldkräfte (Elektroabscheider, Nass-Elektroabscheider)
- Filtration (Gewebefilter, Schüttschichtfilter, Keramikfilter)
- Nassentstaubung (Venturiwäscher, Radialstromwäscher, Abgaskondensation).

Multizyklone werden in jedem Fall angewendet oder als Vorentstaubung und Funkenabscheidung für ein nachgeschaltetes Staubabscheideverfahren eingesetzt. In der Regel können Emissions-Staubgrenzwerte von 150 mg/m^3 (bei 11 Vol.-% O_2) eingehalten werden. Staubwerte < 100 mg/m^3 (bei 11 Vol.-% O_2) können ohne weitere Massnahmen (Primärmassnahmen oder nachgeschaltetes Staubabscheideverfahren) in der Regel nicht garantiert werden. Staubwerte < 50 mg/m^3 (bei 11 Vol.-% O_2) verlangen ein nachgeschaltetes Staubabscheideverfahren.

Gewebefilter bewähren sich bei Holzfeuerungsanlagen, welche zur Bandlastabdeckung betrieben werden (ein Start und eine Ausbrandphase über eine lange Betriebszeit der Anlage). Der Einsatz eines Gewebefilters bei Holzfeuerungsanlagen mit diskontinuierlichem Betrieb bei geringer Auslastung (viele Starts und Ausbrandphasen, häufiger Standbybetrieb, Betriebsunterbrechungen durch kurze Kessel-Reinigungsintervalle) ist durch das Auskühlen des Gewebefilters bei Standbybetrieb problematisch, da die Abgase in der Startphase unter den Taupunkt abkühlen können, was zur Befeuchtung des Gewebes führt. Feuchtigkeit und Staub bilden einen Belag auf dem Gewebe, der mit der Druckluftstossabreinigung nicht entfernt werden kann und zum Verstopfen des Gewebefilters führt. Je feuchter der Brennstoff ist, umso höher ist die Neigung der Gewebefilter zur Verstopfung.

Elektroabscheider brauchen bei Holzfeuerungsanlagen mit diskontinuierlichem Betrieb bei geringer Auslastung eine Begleitheizung (elektrisch oder über das Heizsystem) im Bereich der Ansammlung der Staubpartikel, um das Befeuchten der Partikel in der Startphase und damit den Aufbau eines Belags, welcher nicht mehr automatisch ausgetragen werden kann, zu verhindern. Die Wirksamkeit eines Elektroabscheiders kann zum heutigen Zeitpunkt nicht durch eine kontinuierliche Feinstaubmessung überprüft werden. Mit optischen Messgeräten können Durchbrüche zum Beispiel bei Gewebefiltern erkannt werden (Funktionsüberprüfung). Eine genaue, kontinuierliche Messung der Feinstaubkonzentration ist jedoch nicht möglich. Die Wirksamkeit eines Elektroabscheiders über eine vorgegebene Betriebszeit kann auf der Basis der «FAQ 38: Wie wird die Verfügbarkeit von Elektroabscheidern bestimmt?» ermittelt werden. Das Intervall für den Nachweis der Verfügbarkeit des Elektroabscheiders wird von der Behörde festgelegt. Die Verfügbarkeit muss mindestens jeweils bei einer behördlich verlangten Emissionsmessung zum Beispiel mit FAQ 38 Formular 1 oder 2 ausgewiesen werden.

Aus dem Staubgehalt im Rohgas und dem einzuhaltenden Grenzwert wird der notwendige Abscheidegrad bestimmt.

Mit Hilfe von Tabelle 13.10 wird das geeignete Abscheideverfahren ausgewählt.

Folgende Punkte sind für den Einsatz von Staubabscheideverfahren wichtig beziehungsweise kritisch:

- Wasserdampfgehalt im Abgas (Wassergehalt des Brennstoffs, wechselnder Wassergehalt)
- Abgastemperatur
- Taupunktunterschreitung
- Lastwechsel und Abschaltungen (nächtliche Stillstandsphasen, Wochenendstillstand, Sommerbetrieb)
- Betriebsphasen mit hohem Sauerstoffgehalt verursacht durch Falschluft oder durch zu hohe Verbrennungsluftmengen
- Hoher Anteil an Unverbranntem in der Flugasche.

Tabelle 13.10 Kriterien zur Auswahl von Staubabscheideverfahren.

Kriterien	Beurteilung		
	Gewebefilter	Elektro-abscheider	Nass-Elektro-abscheider
Trockener Brennstoff	++[1)]	++	–
Feuchter Brennstoff	–[2)]	+	++
Bandlastbetrieb	++	++	++
Diskontinuierlicher Betrieb	–	+	+
Reingasstaubgehalt mg/m^3 bei 11 Vol.-% O_2	1 - 5	5 - 50	5 - 20
Abscheidegrad	> 95 %	90 % – 95 %	90 % – 95 %
Absorptionsmittelzugabe (Additiv) für Minderung von HCl, SOx und PCDD/F [3)]	++	–	–
Druckverlust (typische Werte) in mbar	hoch 10 - 20	tief 1.5 - 3.0	mittel 5 - 10

Kriterien	Beurteilung		
Hilfsenergiebedarf (typische Werte) in kWhel/MWh$_{th}$	hoch 14 - 17	tief 2 - 5	mittel 5 - 10
Platzbedarf	mittel	hoch	hoch
Betriebsbereich Abgastemperatur	140 - 220 °C	80 - 250 °C	40 - 60 °C[4]
Bypass notwendig	ja	optional	optional
Empfindlichkeit gegenüber Glutpartikeln, Funkenflug	hoch	tief	tief
Investitionskosten	mittel	hoch	hoch
Betriebskosten (Instandhaltung und Hilfsenergie)	hoch	tief	mittel

Beurteilung ++ sehr gut geeignet, typisches Einsatzgebiet
+ geeignet
– nicht geeignet

[1] Bandlastbetrieb vorteilhaft
[2] bei Bandlastbetrieb bedingt geeignet
[3] z. B. notwendig bei Altholz
[4] Entschwadung in der Regel notwendig, geeignet in Kombination mit Abgaskondensation

13.9.2 Auswahl Stickoxidminderungsverfahren

Der Begriff Stickoxid umfasst Stickstoffmonoxid NO und Stickstoffdioxid NO_2, deren Summe oft mit NO_x bezeichnet wird. Die NO_x-Minderungsverfahren beruhen darauf, bereits gebildetes NO mit stickstoffhaltigen Zwischenverbindungen zu molekularem Stickstoff N_2 umzuwandeln, zum Beispiel nach der Reaktion $NO + NH_2 \rightarrow N_2 + H_2O$. Je nach Verfahren sind dazu geeignete Reaktionsbedingungen (Temperatur, Verweilzeit, Reduktionsmittel) notwendig.

Vorgehen

1. Entscheiden, ob eine NO_x-Minderung notwendig ist
2. Bestimmen des notwendigen Entstickungsgrades zur Einhaltung der Emissionsanforderungen
3. Auswahl des geeigneten NO_x-Minderungsverfahrens

Ob eine NO_x-Minderung notwendig ist, hängt einerseits von den Emissions-Grenzwerten bezüglich der NO_x-Konzentration und des NO_x-Massenstroms ab, andererseits vom Stickstoffgehalt des Brennstoffs beziehungsweise der daraus resultierenden NO_x-Emissionen. Die NO_x-Emissionen des vorgesehenen Brennstoffsortimentes sind bei vergleichbaren Anlagen zu bestimmen oder anhand von Erfahrungswerten (z. B. Tabelle 4.9 oder Tabelle 13.11) abzuschätzen. Die Berechnung des NO_x-Massenstroms aus der NO_x-Konzentration und dem Abgasvolumenstrom sowie die Behandlung von Ein- und Mehrkesselanlagen sind in [137] beschrieben. Mit der NO_x-Konzentration und der Feuerungswärmeleistung, das heisst der Nennwärmeleistung dividiert durch den Kesselwirkungsgrad, kann anhand von Bild 13.28 abgeschätzt werden, ob eine NO_x-Minderung notwendig ist.

Ist eine NO_x-Minderung notwendig, so ist der erforderliche Entstickungsgrad zur Einhaltung der Emissionsanforderungen zu bestimmen und aus Tabelle 13.12 das geeignete NO_x-Minderungsverfahren auszuwählen.

Weitere Hinweise sind im Kapitel 5.8.2 zu finden.

Tabelle 13.11 Typische NO_x-Emissionen verschiedener Brennstoffe bei Anlagen ohne NO_x-Minderungsverfahren.

Brennstoff	NOx-Emission [mg/m^3]	
	bei 11 % O_2	bei 13 % O_2
Niedriger Stickstoffgehalt, zum Beispiel entrindete Fichte	100 - 150	80 - 120
Mittlerer Stickstoffgehalt, zum Beispiel Waldholz mit Rinde	150 - 250	120 - 200
Erhöhter Stickstoffgehalt, zum Beispiel Rinde, Altholz, Holz aus Landschaftspflege	250 - 400	200 - 320
Hoher Stickstoffgehalt, zum Beispiel UF-Spanplatten	400 - 1'000	320 - 800

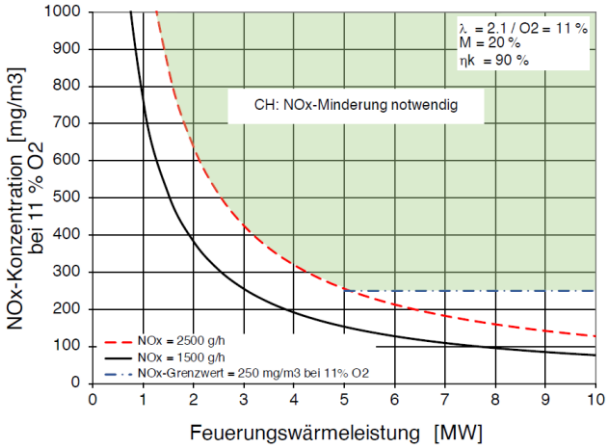


Bild 13.28 NO_x-Konzentration in Funktion der Feuerungswärmeleistung als Kriterium für NO_x-Minderungsmassnahmen.

Tabelle 13.12 Entstickungsgrad und Randbedingungen verschiedener NO_x-Minderungsverfahren (Beschreibung der Verfahren siehe Kapitel 5.8.2).

NO_x-Minderungsverfahren	Entstickungsgrad N-Gehalt	Randbedingungen
Primärmassnahmen «Low NOx» (ohne Reduktionsmittel)		
Luftstufung	niedrig: 30 - 50 % hoch: 50 - 70 %	interne Reaktionszone, Primärluftzahl 0.7 - 0.8, Reaktion ab etwa 1'100 - 1'200 °C, bedingt geeignet für aschereiche Brennstoffe
Brennstoffstufung	niedrig: 40 - 50 % hoch: 60 - 75 %	zwei Brennstoffzuführungen, interne Reaktionszone, Primärluftzahl 0.8 – 0.9, Reaktion ab etwa 800 °C
Sekundärmassnahmen «DeNOx» (mit Reduktionsmittel)		
SNCR-Verfahren	50 - 75 %	interne Reaktionszone, Temperaturfenster etwa 850 - 950 °C, Molverhältnis wichtig, unerwünschte Nebenprodukte möglich
SCR-Verfahren low dust	90 - 95 %	Temperaturfenster 200 - 250 °C, Staubabscheidung vor Kat

Die Aktivität der Katalysatoren beim SCR-Verfahren wird durch den Eintrag von Alkalimetallen über die Abgase kontinuierlich reduziert und die Wirksamkeit der Katalysatoren nimmt stetig ab, da sie durch die Alkalimetalle vergiftet werden. Aus dem Grund kann das SCR-Verfahren im «low dust»-Modus mit vorgeschalteter Staubabscheidung betrieben werden.

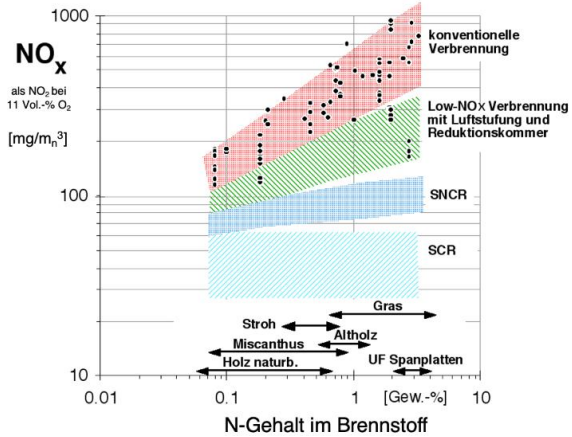


Bild 13.29 Vergleich der NOx-Emissionen in Abhängigkeit der unterschiedlichen Stickstoffgehalte im Brennstoff bei unterschiedlichen Reduktionsmassnahmen [121].

Feuerungshersteller können das Einhalten von vorgegebenen NO_x-Emissionsgrenzwerten nur garantieren, wenn sie genaue Angaben über den Stickstoffgehalt im vorgegebenen Brennstoff erhalten (Brennstoffanalysen). Die Stickstoffgehalte einzelner Brennstoffsortimente in Kapitel 4 (Tabelle 4.9, Tabelle 4.10 und Tabelle 4.11) ermöglichen eine Abschätzung des Stickstoffgehalts im Brennstoff.

13.9.3 Auswahl Zusatzkomponenten

Zusatzkomponenten wie Wärmespeicher oder Economiser werden anhand der detaillierten Anforderungen an die Holzfeuerungsanlage festgelegt (siehe Kapitel 5.9 und Kapitel 7.5).

13.10 Auslegung Heizzentrale

13.10.1 Heizzentrale

13.10.1.1 Heizraumgestaltung, Raumbedarf

Der Heizraum soll nach Möglichkeit direkt neben oder unter dem Silo platziert werden, damit komplizierte und

kostenintensive Fördereinrichtungen entfallen. Anlagen mit einer Nennleistung über 200 bis 400 kW benötigen eine Heizraumhöhe von über 3 m (auch 2-geschossig mit Podest möglich). Zudem ist genügend Platz für die Anlagenwartung und die Reinigungsarbeiten im Feuerraum und am Kessel vorzusehen.

Bei der Heizraumdisposition müssen neben den Zusatzkomponenten wie Grobentstaubung und Feinentstaubung auch die hydraulische Einbindung der Kessel, Wärmespeicher, Wassererwärmer, Verteilsystem, Expansion, Schaltschrank, Abgasreinigung, Aschencontainer usw. berücksichtigt werden.

Der Raumbedarf ist in einer Dispositionszeichnung von Silo und Heizraum im Massstab 1 : 50 aufzuzeigen.

13.10.1.2 Hydraulische Einbindung der Kesselanlage

Für die hydraulische Einbindung der Kesselanlage sind die Standard-Schaltungen gemäss QM Holzheizwerke zu übernehmen (siehe [62] oder [71]).

Um die Sicherheit der Wärmeversorgung einzuhalten, wie sie im Q-Leitfaden als Q-Forderung D.4.8 [15] aufgeführt ist, sind bei monovalenten Einkesselanlagen Anschlussstutzen für eine Notheizung, zum Beispiel eine mobile Heizzentrale, anzubringen.

13.10.1.3 Heizraumbelüftung

Die Zufuhr der Verbrennungsluft in den Heizraum muss in jedem Fall gewährleistet sein. Die Verbrennungsluft ist grundsätzlich durch eine Zuluftöffnung direkt dem Freien zu entnehmen und darf weder Staub noch schädliche oder brennbare Gase oder Dämpfe enthalten. Bei grösseren Anlagen ist zusätzlich zur Zuluft- auch eine Abluftöffnung vorzusehen. Die beiden Öffnungen sind möglichst gegenüber beziehungsweise diagonal zueinander anzuordnen, damit eine Querlüftung des Heizraums erreicht wird, welche einen Wärmestau im Sommer verhindert.

Es ist sinnvoll, die Verbrennungsluft an der Decke des Heizraums anzusaugen. Dadurch wird die Abwärme wieder genutzt, und der obere Teil des Heizraums lässt sich kühler halten.

Holzfeuerungen und ihre Transporteinrichtungen erzeugen mehr Lärm als Öl- und Gasfeuerungen. Die Zu- und Abluftöffnungen des Heizraums müssen die in Kapitel 13.10.5 erwähnten Lärmschutzbestimmungen erfüllen. Sie werden deshalb oft schallgedämmt mittels Schalldämm-Wetterschutzgitter oder noch besser nach dem «Schnorchelprinzip» mit integriertem Kanalschalldämpfer ausgeführt.

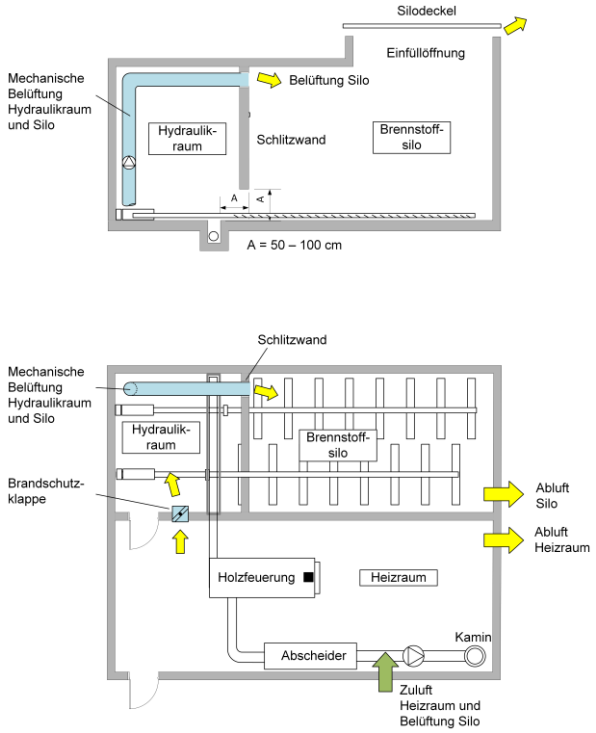


Bild 13.30 Kombinierte Heizraum- und Silobelüftung.

13.10.1.4 Dimensionierung der Belüftungseinrichtung

Für die Belüftung des Heizungsraums und die Verbrennungsluftzufuhr gelten die gleichen Anforderungen wie bei konventionellen Anlagen. Die Heizraum- und Silobelüftung werden oft kombiniert (siehe Bild 13.30).

Die wichtigsten Aufgaben der Belüftungseinrichtung sind:

- Sicherstellung der Verbrennungsluftzufuhr (Berechnung der Verbrennungsluftmenge siehe Kapitel 20.8).
- Abführung des im Heizraum anfallenden Wärmeüberschusses. Die Abwärmeleistung kann durch Strahlungsverluste des Holzkessels, Partikelabscheiders und die hydraulische Einbindung mit dem Speicher etwa 2 bis 3 % der in Betrieb stehenden Holzkesselleistung betragen. Das Abführen der anfallenden Abwärme in der Heizzentrale ist zu klären, damit die Temperaturen an der Deckenunterseite der Heizzentrale nicht über 30 °C (kurzfristig nicht über 35 °C) ansteigen.
- Aufrechterhaltung eines Luftzustandes im Heizraum, der den Aufenthalt einer Person ohne Beeinträchtigung der Gesundheit ermöglicht.
- Verhinderung eines Unterdruckes im Heizraum (< 10 Pa), der den Betrieb der Anlage störend beeinträchtigt sowie das Öffnen der Eingangstüren erschweren kann.
- Es ist eine ausreichend grosse Querschnittsöffnung entsprechend den jeweils geltenden Vorschriften und den darin enthaltenen Formeln auszulegen und vorzusehen (siehe Kapitel 19). Beispielsweise kann in der Schweiz die Querschnittsfläche der Zuluftöffnung mit folgender Formel bestimmt werden:

$$A_{Zuluft}\left[cm^2\right] = 6\left[\frac{cm^2}{kW}\right] * \dot{Q}_K\,[kW]$$

Annahmen:

$\dot{Q}$ Kesselleistung in kW, η_K = 85 %, λ = 2,
M = 40 %; Zuluft = 1 m/s

Die Querschnittsöffnung A_{Zuluft} ist zu vergrössern, wenn zusätzlich zur Verbrennungsluft weitere Luftströme in den Heizraum gelangen, beispielsweise wenn

- die Silobelüftung ihre Zuluft aus dem Heizraum bezieht (siehe Kapitel 14.2.4).
- der notwendige Luftvolumenstrom für das Abführen des Wärmeüberschusses in der Heizzentrale auch durch den gleichen Querschnitt angezogen wird. Dabei ist zu beachten, dass bei sehr warmer Witterung die Feuerungsanlage eventuell nicht bei Nennleistung betrieben wird und somit ein kleinerer Verbrennungsluftstrom in die Berechnung mit einbezogen werden kann.

Grundsätzlich sind für die Dimensionierung der Belüftungseinrichtungen alle relevanten nationalen und regionalen Vorschriften, Normen und Richtlinien einzuhalten.

13.10.2 Heizcontainer und Heizzentrale als Fertigbauelement

Heizcontainer und Heizzentralen als Fertigbauelemente sind sinnvolle Übergangslösungen und Provisorien für die Startphase eines Wärmeverbundes. Sie eignen sich aber auch als definitive Lösung mit folgenden Merkmalen:

- Konstruktion: Container oder vorfabrizierte Fertigbauelemente, aufgestellt auf Bodenfundamenten
- Brennstofflagerung: integriert in Container oder Fertigbauelement bei kleiner Kesselleistung, Heizcontainer/Fertigbauelement mit grosser Kesselleistung versorgt über zwei Schubbodenwechselcontainer mit einem Silovolumen von je 36 m³ oder weitere Fertigbauelemente, welche miteinander verbaut sind
- Maximale Kesselleistung Industriekessel: bis ca. 500 kW bei Containerhöhe von 3 Meter, bis ca. 1'000 kW bei Containerhöhe von 4 Meter.
- Maximale Kesselleistung Seriengeräte: 250 kW bis 450 kW. Es können mehrere Container kombiniert werden, es sind pro Container in der Regel ein bis zwei Kessel installiert (Pellets, Qualitätshackgut).
- Anforderungen an den Brennstoff siehe Kapitel 13.4



Bild 13.31 Heizcontainer (Quelle: Jenni Energietechnik und Schmid energy solutions).



Bild 13.32 Containeranlage mit integriertem Brennstoffsilo und einfacher Holzverkleidung (Quelle: Holzenergie Schweiz).

13.10.3 Hilfsenergiebedarf

Der jährliche Hilfsenergiebedarf in der Heizzentrale beträgt ungefähr 1.0 bis 1.5 % der erzeugten Wärmemenge, sofern auf einen effizienten Einsatz der Hilfsenergie geachtet wird. Dazu gehören bei den elektrischen Antrieben:

- richtig dimensionierte Motoren
- guter Wirkungsgrad (v. a. des Abgasventilators)
- drehzahlgeregelte Motoren

Bei Anlagen mit Elektroabscheidern, Economisern, Abgaskondensationsanlagen und weiteren Systemen kann der Hilfsenergiebedarf auch höher sein.

13.10.4 Schornstein, Kamin

13.10.4.1 Dimensionierung Kaminhöhe

Die Dimensionierung der Kaminhöhe muss nach den länderspezifischen Vorschriften erfolgen sowie die lokalen Brand- und Lärmschutzvorschriften erfüllen (siehe Kapitel 19).

Folgende Einflussfaktoren bestimmen die Kaminhöhe:

- Gebäudeabmessungen (Höhe, Breite)
- Feuerungswärmeleistung
- Immissionsniveau in Abhängigkeit des höchsten Hindernisbereichs im Einwirkungsgebiet

13.10.4.2 Dimensionierung Kaminquerschnitt

Die Dimensionierung des Kaminquerschnittes muss nach den länderspezifischen Vorschriften (siehe Kapitel 19) erfolgen. Es ist Aufgabe der Planerin oder des Planers, die korrekte Dimensionierung durch den Kaminlieferanten sicherzustellen und den offerierten Kamin durch Rücksprache mit dem Feuerungslieferanten auf Konfor-

mität mit den gültigen Vorschriften zu überprüfen. Folgende Vorgaben an den Kaminlieferanten sind für die Dimensionierung relevant:

- Abgastemperatur und Druck am Kamineintritt
- Kaminhöhe und geforderte Abgastemperatur an der Mündung
- Abgasfeuchtigkeit.

13.10.4.3 Kaminkonstruktion

Bei der Verbrennung von feuchten Hackschnitzeln liegt der Taupunkt des Abgases bei rund 60 °C. Grundsätzlich eignen sich bei diesen Randbedingungen gut isolierte, rostfreie Stahlkamine am besten. Bei den sehr trockenen Holzpellets liegt der Taupunkt bei einem Luftüberschuss von 1.5 bis 2.0 mit 40 °C bis 45 °C etwas tiefer.

Besondere Vorsicht ist im Sanierungsfall bei der Verwendung bestehender Kamine geboten. Oft ist der Einzug eines neuen rostfreien Kaminzugs mit Schüttisolation die einzige Lösung. Dabei ist darauf zu achten, dass die Schüttisolation fachgerecht hinterfüllt wird, weshalb ein Kaminlieferant mit Erfahrung bei Holzfeuerungen empfohlen wird.

Bei Neuanlagen soll der Holzkessel mit möglichst tiefen Abgastemperaturen (< 150 °C) betrieben werden können, was einen gut isolierten Kamin erfordert. Mögliche Kamintypen sind:

- Keramikkamine
- Glattwandige, starre Chromnickelstahlrohre mit einer Wandstärke von 1.0 bis 1.5 mm.
- Aus Einzelstücken zusammengesetzte Kamine.

Die Kaminkonstruktion muss die länderspezifischen Vorgaben bezüglich Russbrandbeständigkeit und Statik erfüllen.

13.10.4.4 Stutzen für Emissionsmessungen

Für die Emissionsmessung bei abnahme- und messpflichtigen Anlagen ist im vertikalen Kaminteil ein Normstutzen anzubringen (z. B. «EMPA-Normstutzen», siehe Bild 13.33). Vor und nach dem Stutzen ist eine Beruhigungszone entsprechend den länderspezifischen Vorschriften zu berücksichtigen. Die genaue Position ist mit dem zuständigen Kaminkehrer und mit der abnehmenden Behörde vor dem Einbau abzuklären.

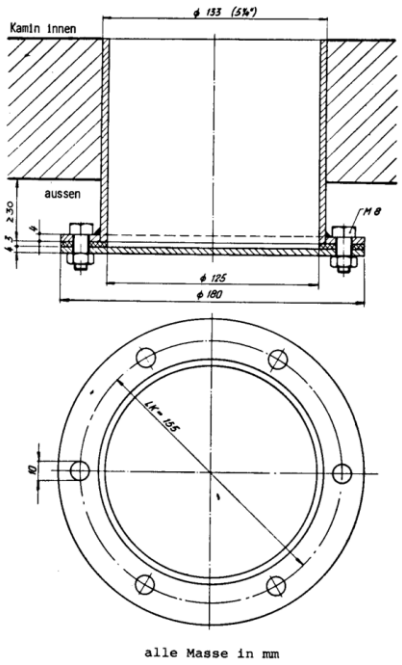


Bild 13.33 Einbaumasse EMPA-Normstutzen [68].

13.10.5 Lärmschutz

Bei der Planung einer automatischen Holzheizungsanlage sind die Auswirkungen der Schallausbreitung (Luft- und Körperschall) beim Betrieb der Anlage in jedem Fall abzuklären. Luftschall verbleibt nicht dort, wo er erzeugt wird, sondern wird über die Luft übertragen und vermag auch Gebäudeteile zu durchdringen. Körperschall wird durch Vibrationen oder Schwingungen ausgelöst, durch feste Körper weitergeleitet und als Luftschall wieder abgestrahlt. Die Energien, die in ein Bauteil eingeleitet werden, sind bedeutend grösser als beim Luftschall. Die Körperschallausbreitung kann mit Schwingungsdämmelementen wesentlich vermindert werden.

Bezüglich Schallschutzes sind die jeweils gültigen Normen, Vorschriften und Richtlinien einzuhalten. In der Schweiz beispielsweise sind, analog der Zonenplanung (Definition von Nutzungsarten und Gebäudehöhen), in der Lärmschutz-Verordnung (LSV) die Empfindlichkeitsstufen als Teil der Nutzungsplanung definiert. Je nach Art der Nutzung wird mit der Zuordnung der Empfindlichkeitsstufe durch die Gemeinde festgelegt, wie viel Lärm eine Anlage erzeugen darf beziehungsweise wie viel Lärm die Anwohner zu erdulden haben.

In der Lärmschutz-Verordnung sind die Grenzwerte der maximalen Schalldruckpegel für die einzelnen Bereiche aufgeführt. Wobei der Beurteilungspegel die Summe von Messpegel und Pegelkorrektur aufweist. Die Pegelkorrektur wird in Abhängigkeit von Tongehalt und Impulsgehalt bestimmt. So kann zum Beispiel der Pegelkorrekturwert bei Förderanlagen (Kratzkettenförderer, Schneckenförderer), die taktweise betrieben werden und beim Anfahren ein starkes Knackgeräusch abgeben, eine bedeutende zusätzliche Erhöhung des Beurteilungspegels zur Folge haben.

$$\text{Beurteilungspegel} = \text{Messpegel} + \text{Pegelkorrektur}$$

Der zulässige Beurteilungspegel ist vom Ruhepegel am Tag und in der Nacht abhängig. So sind Lärmimmissionen einer Holzheizungsanlage wesentlich unproblematischer, wenn ein hoher Ruhepegel durch andere Lärmemissionsquellen wie Verkehr, Gewerbe und Industrie vorhanden ist.

Im Handbuch Schallschutz in Haustechnikanlagen [138] sind detailliert weitere Schallschutzmassnahmen im Bereich der Heizungsinstallationen aufgeführt.

Bezüglich der Verantwortung zur Einhaltung der länderspezifischen Lärmschutzvorschriften (siehe Kapitel 19) lassen sich folgende Hinweise machen:

- Bei der Zusammensetzung des Planungsteams muss überprüft werden, wer die schalltechnische Planung übernimmt. Die schalltechnische Planung ist eine interdisziplinäre Aufgabe, die alle Fachbereiche miteinbezieht und durch einen Schallschutzspezialisten wahrgenommen werden muss.
- Die Organisation, die für die Gesamtverantwortung des Projekts gegenüber dem Auftraggeber zuständig ist (Architekt, Generalplaner, Generalunternehmer, Planerkonsortium), hat den Schallschutzspezialisten (z. B. Akustikingenieur) für die schalltechnische Planung mit Zuständigkeit und Verantwortung zu bestimmen.
- Der Haustechnikingenieur oder Anlageplaner der Holzheizungsanlage ist verpflichtet, den Schallschutzspezialisten auf die Lärmquellen der Holzheizungsanlage aufmerksam zu machen. Im Weiteren hat er auch die technischen Daten, die der Schallschutzspezialist von der Holzheizungsanlage verlangt, zur Verfügung zu stellen.

Folgende Anlagenteile einer Holzheizungsanlage sind kritische Lärmemissionsquellen und haben in der Vergangenheit Anlass zu Beanstandungen gegeben (siehe Bild 13.34).

Abgasventilator
Der Abgasventilator ist die wichtigste Lärmquelle bei Holzheizwerken. Probleme entstehen hauptsächlich bei Anlagen, bei welchen ein hoher Förderdruck notwendig ist, durch hohe Schalldruckpegel an der Kaminmündung und in den Räumen, die an den Kamin angrenzen. Folgende Massnahmen können die Lärmemissionen reduzieren:

- Abgasschalldämpfer.
- Verbindung Abgasrohr – Kamin bezüglich Vibrationsübertragung trennen.
- Ventilator mit hohem Förderwirkungsgrad, der keine Unwucht aufweist und mit möglichst tiefer Drehzahl betrieben werden kann.
- Lagerung des Abgasventilators auf schwingungsdämpfenden Elementen.
- Kaminanordnung so wählen, dass die Kaminmündung zum Beispiel nicht direkt neben einem Schlafzimmerfenster ausgeführt wird.
- Jegliche Körperschallübertragung vom Kamin an den Baukörper ist zu unterbinden.
- Kamin soll nicht an Räume mit hoher Lärmschutzanforderung angrenzen.

Siloaustragungssystem
Folgende Massnahmen können die Lärmemissionen von Schubböden, Austragungsschnecken und Hydraulikaggregaten reduzieren:

- Silobaukörper bezüglich Körperschallübertragung vom Baukörper angrenzender Wohn- oder Arbeitsräume trennen.
- Hydraulikaggregat auf Schwingungsdämpfer montieren und mit einer Schallschutzhaube einkleiden.

Fördersystem: Kratzkettenförderer, Förderschnecken
Folgende Massnahmen können die Lärmemissionen des Fördersystems reduzieren:

- Heizraumbaukörper bezüglich Körperschallübertragung vom Baukörper angrenzender Wohn- oder Arbeitsräume trennen.
- Fördersystem bei der Montage bezüglich Körperschallübertragung mit Schwingungsdämpfer oder körperschalldämmenden Matten trennen.

Heizraum
Die Luftschallübertragung aus dem Heizraum kann durch folgende Massnahmen reduziert werden:

- Geschlossene Bauhülle mit genügend hohem Schalldämmwert.
- Öffnungen gegen aussen mit Schalldämpfer ausrüsten, beispielsweise den Verbrennungsluftzufuhrkanal mit Schalldämmkulissen ausführen.
- Heizraumdecke mit Schallabsorptionsplatten versehen.
- Verbrennungsluftventilatoren mit Ansaugschalldämpfer montieren.

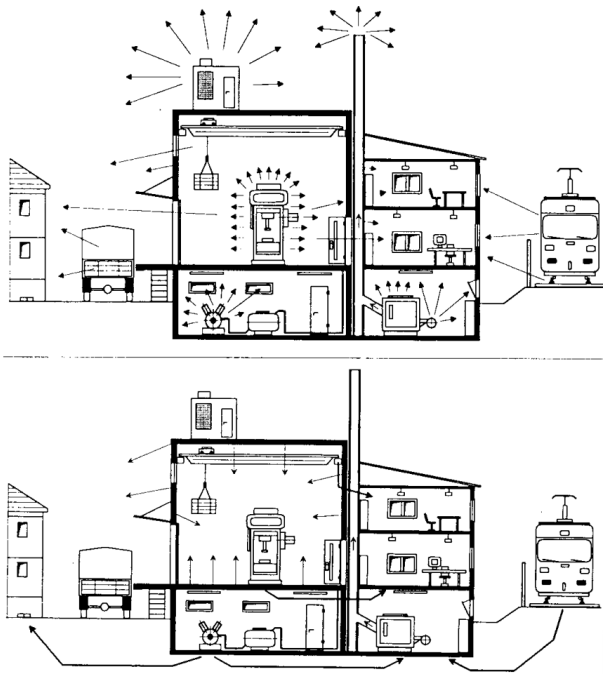


Bild 13.34 Luft- und Körperschall [68].

14 Auslegung von Brennstoffflagerung und -förderung

14.1 Allgemeine Hinweise

Bei der Anordnung des Brennstofflagers sind folgende Voraussetzungen zu beachten:

- Leicht zugängliche Anfahrtsstrasse
- Wendemöglichkeit des Lieferfahrzeugs vor der Abladestelle ohne aufwendige Manöver (erforderlichen Wenderadius beachten)
- Geringer Aufwand für Brennstofflogistik in Lagerhalle: «first in, first out»
- Geländetopographie für einfaches Abschütten des Brennstoffes nutzen (z. B. Abladestelle bei Hanglage am höchsten Punkt)

In der Phase der Projektierung des Brennstofflagers sollten die möglichen Varianten der Anordnung mit dem zukünftigen Brennstofflieferanten bereinigt werden, um die Anlieferung des Brennstoffes mit geringem Zeitaufwand zu ermöglichen.

In der Tabelle 14.1 sind die Brennstofflagertypen in Abhängigkeit des Brennstoffsortiments und der Versorgungsstrategie gegliedert.

Zu beachten sind die Anforderungen an die bauliche Gestaltung und den Betrieb entsprechend den gültigen länderspezifischen Empfehlungen und Vorschriften (siehe Kapitel 19). Insbesondere sind dies folgende:

- Brand- und Explosionsschutz.
- Sicherheitsbestimmungen, damit Personenunfälle verhindert werden können und Personen mit entsprechender Schutzausrüstung die Silobewirtschaftung ungefährdet vornehmen können.
- Vorgehensweise bei Störungen und deren Beseitigen.
- Notaustragungssystem.

14.2 Auswahl und Dimensionierung der Brennstofflagerung

14.2.1 Brennstofflagertypen

Die geeignete Wahl und Dimensionierung der Brennstofflagerung sind abhängig vom Brennstoffsortiment, vom Jahresbrennstoffbedarf und von der Versorgungsstrategie, welche auf einer direkten, einer indirekten oder einer gemischten Versorgungskette basieren kann. Gegebenenfalls müssen auch spezielle lokale Rahmenbedingungen (zum Beispiel begrenzte Brennstoffverfügbarkeit in den Weihnachtsferien, Zugänglichkeit des Waldes im Winter, eingeschränkte Anlieferungszeiten usw.) berücksichtigt werden.

Bei der Energieholzversorgung aus erhöhten Regionen, in denen kein ganzjähriger Holzschlag möglich ist, wird das Holz in tieferen Lagen oder direkt beim Holzheizwerk als **Rundholz im Polter** zwischengelagert und dort bei Bedarf gehackt oder als Hackschnitzel in Lagerhallen zwischengelagert. Dies ermöglicht den Bau von kleinen und damit kostengünstigen Silos bei den Brennstoffkunden respektive im Holzheizwerk.

Brennstofflagertypen:

- **Silo** (Bunker): Ein automatisches Brennstoffaustragungssystem fördert den eingelagerten Brennstoff im Silo in das Transportsystem der Holzkesselanlage.
- **Lagerhalle**: Die witterungsgeschützte Brennstoffzwischenlagerung erfolgt in einer Lagerhalle. Die Lagerhalle beim Holzheizwerk verfügt in der Regel über ein Tagessilo.
- **Aussenlager**: Zwischenlagerung im Freien von Hackschnitzeln auf Halden und Rundholz auf Poltern.

14.2.2 Dimensionierung

In der richtigen Dimensionierung der Brennstofflagerung liegt ein grosses Sparpotenzial. Eine detaillierte Optimierung ist deshalb vordringlich.

Aus Kostengründen ist der Brennstoffsilo mit dem Austragungssystem grundsätzlich so klein wie möglich auszulegen. Die Grösse kann jedoch nicht losgelöst von der Brennstofflogistik beurteilt werden, sondern sie ist Teil des Versorgungskonzepts.

Die Kosten können in der Regel in einem vernünftigen Rahmen gehalten werden, wenn der Brennstoffsilo bei **direkter Versorgungskette** fünf bis sieben Tagesbedarfe der Feuerungsanlage bei Nennleistungsbetrieb plus Zusatzsilovolumen fasst.

Zusatzsilovolumen
Der Brennstoffsilo ist in der Regel bei der Anlieferung nicht vollständig leer (erforderlicher zeitlicher Spielraum zwischen Bestellung und Lieferung). Dementsprechend sollte zu den vorgegebenen Tagesbedarfen ein Zusatzsilovolumen berücksichtigt werden. Das Zusatzsilovolumen sollte gleich gross wie das Transportvolumen des grössten Lieferfahrzeuges sein, um sicherzustellen, dass das Befüllen des Silos mit den vorgegebenen Tagesbedarfen mit voll beladenem Lieferfahrzeug erfolgen kann.

Für monovalente Feuerungen entspricht dies einer Versorgungsdauer von sechs bis acht Tagen, da der Wärmeleistungsbedarf in der Regel nicht während 24 Stunden der Kesselnennleistung entspricht. In einem durchschnittlichen Winter führt dies zu rund 20 Beschickungen des Brennstoffsilos. Bei **indirekter Versorgungskette** mit kurzfristig verfügbarer Transportlogistik ab Zwischenlager (zum Beispiel Lagerhalle) kann die Grösse des Brennstoffsilos auf 2 bis 4 Tagesbedarfe reduziert werden. Oft verfügen Heizwerke über grosse Lagerkapazitäten (Lagerhalle, Freilager mit Polter etc.), sodass die Zwischenlagerung direkt am Heizwerk erfolgen kann. In diesem Fall kann der Brennstoffsilo auch deutlich kleiner (z. B. ein Tagesbedarf) dimensioniert werden.

Die Anzahl der Fahrzeugbewegungen für die Beschickung des Brennstofflagers ist abhängig vom Jahresbrennstoffbedarf und der Transportkapazität des Fahrzeugs.

- **Direkt** aus dem Wald: Ein LKW kann 40 bis 50 (60) Srm Hackschnitzel direkt aus dem Wald befördern, ein LKW-Zug mit Anhänger 70 bis 80 Srm. Grundsätzlich sollten die angelieferten Hackschnitzel eines LKWs sofort und bei einem Lastwagenzug mit Anhänger die zusätzlichen 40 Srm nach 10 Minuten Umsetzzeit abgeladen werden können.
- Ab **Zwischenlager**: Ein LKW mit Abschiebe- oder Schubbodensattelauflieger kann 80 bis 90 Srm anliefern.

Nebst dem Lagervolumen ist auch bei der Konstruktion des Lagers, den notwendigen Hilfseinrichtungen für das Einfüllen und Verteilen des Brennstoffs sowie den Belüftungseinrichtungen auf kostengünstige Lösungen zu achten. Zusätzlich sind die entsprechenden Sicherheitseinrichtungen und Vorschriften zu beachten.

Dimensionierungsbeispiel:

Eine Holzkesselanlage mit einer Nennwärmeleistung von 300 kW und einem Kesselwirkungsgrad η_K von 90 % wird mit Waldhackschnitzeln (HH, Hu ≈ 900 kWh/Srm) betrieben. Der **Tagesbedarf** der Feuerungsanlage bei Nennleistung beträgt:

$$B = \frac{E_{24h}}{H_U} = 24\frac{\dot{Q}}{H_U\ \eta_K} = 24\frac{300}{900\ 0.9} = 8.9\frac{Srm}{d}$$

Für einen 5-fachen Tagesbrennstoffbedarf plus eine Containerladung beträgt das **Silonettovolumen** somit:

$$V_{Netto} = 5\frac{d}{1} * 8.9\frac{Srm}{d} + 40\ Srm = 84.5\ Srm = 84.5\ m^3$$

Für einen Füllgrad von 70 % beträgt das **Silobruttovolumen** somit:

$$V_{Brutto} = \frac{V_{Netto}}{Füllgrad} = \frac{84.5\ m^3}{0.7} \approx 121\ m^3$$

Der Füllgrad kann über den Schüttwinkel des Brennstoffs oder aus den Angaben über das Siloverteilsystem (Siloverteiler oder Siloeinschubförderer) bestimmt werden.

Tabelle 14.1 Wahl des Brennstofflagertyps in Abhängigkeit des Brennstoffsortiments und der Versorgungsstrategie.

Brennstoffsortiment	**Brennstofflagertyp**	**Versorgungskette**	**Dimensionierung** Tagesbedarfe der Holzkesselanlage bei Nennleistungsbetrieb	**Tagesbedarf** der Holzkesselanlage bei Nennleistungsbetrieb
Pellets	geschlossenes Pelletsilo, Lagerraum absolut trocken Rundsilo oberirdisch	indirekt	ungefähr 20 Tagesbedarfe, siehe Abbildung 35 gemäss [67]	
Qualitäts-Hackschnitzel	Unterflursilo, oberirdisches Silo	indirekt	5 - 7 Tagesbedarfe plus Zusatzsilovolumen[1)]	
Hackschnitzel bis P45S-M55+	Unterflursilo	direkt	5 - 7 Tagesbedarfe plus Zusatzsilovolumen[1)]	< 50 Srm/d
Hackschnitzel bis P45S-M55+	Rundsilo oberirdisch	direkt	5 - 7 Tagesbedarfe plus Zusatzsilovolumen[1)]	> 50 Srm/d
Hackschnitzel bis P45S-M55+	Lagerhalle mit Tagessilo	gemischt	minimal 7 Tagesbedarfe	> 50 Srm/d
LH, DH, RZ, Ruz und Altholz bis P63-M55+	Lagerhalle mit Tagessilo, Rundsilo oberirdisch	gemischt	minimal 7 Tagesbedarfe	
RHH	runde oder quadratische Silos	direkt	Abstimmen Anfall und Bedarf	

1) Der Brennstoffsilo ist in der Regel bei der Anlieferung nicht vollständig leer (erforderlicher zeitlicher Spielraum zwischen Bestellung und Lieferung). Dementsprechend sollte zu den vorgegebenen Tagesbedarfen ein Zusatzsilovolumen berücksichtigt werden. Das Zusatzsilovolumen sollte gleich gross wie das Transportvolumen des grössten Lieferfahrzeuges sein, um sicherzustellen, dass das Befüllen des Silos mit den vorgegebenen Tagesbedarfen mit voll beladenem Lieferfahrzeug erfolgen kann.
Srm = Schüttraummeter Hackschnitzel

14.2.3 Auslegung Brennstoffsilo

Unterflursilos
Unterflursilos (siehe Bild 14.1) können ohne Hilfsvorrichtung direkt ab Transportfahrzeug über eine oder mehrere Einfüllöffnungen beschickt werden. Die ideale und kostengünstigste Abmessung hat ein hohes Silo mit quadratischer Grundfläche und einem Silodeckel, welcher nach Möglichkeit nicht befahrbar ausgeführt ist. Um bei einer Siloeinfüllöffnung einen Füllgrad > 70 % zu erreichen, muss das Verhältnis von Höhe zu Breite mindestens 1 betragen. Die Siloform wird idealerweise mit weiteren aneinandergereihten Kuben erweitert. Um bei anderen Siloabmessungen einen Füllgrad > 70 % zu erreichen, kann der Brennstoff entweder über mehrere Siloöffnungen oder mit Befüllungsschnecken respektive Siloverteilern eingebracht werden.

Die Siloöffnung soll als minimale lichte Abmessung eine Länge von 3.5 m und eine Breite von 2 m haben. Damit lässt sich der Arbeitsaufwand beim Abladen verringern:

- Kürzere Abladezeit durch weniger Manöver des Lastwagens und besseres Fliessverhalten der Hackschnitzel
- Keine nachträgliche Reinigung des Abladeplatzes
- Weniger Beschädigungen am Silodeckel.

Vorteile von Unterflursilos sind ihr hoher Füllgrad (> 70 %). Ausserdem sind keine teuren Einbring- und Verteilvorrichtungen notwendig. Zu den Nachteilen von Unterflursilos zählt, dass sie bei Grundwasserproblemen zum Teil nicht realisierbar sind und in der Regel höhere Baukosten (Aushub- und Betonarbeiten) aufweisen.



Bild 14.1 Beschickung Unterflursilo (Quelle: Holzenergie Schweiz).

Die Silogrösse und -geometrie wird bestimmt durch die Forderung nach geringen Kosten und die Breite einer Schubstangeneinheit von maximal 2 m. Für breitere Silos sind mehrere Schubstangen vorzusehen, was sich wiederum auf die Kosten auswirkt. Weitere Faktoren, die sich auf die Geometrie und Grösse auswirken, sind die Forderung nach einem möglichst hohen Füllgrad (> 70 %) sowie der Schüttwinkel von Hackschnitzeln. Dieser liegt in der Regel bei 45°. Somit ist bei Unterflursilos mit ebenerdigen Einfüllöffnungen ein hohes Silo anzustreben, wobei die Höhe das 1.5-Fache der Breite nicht überschreiten sollte, um eine Brückenbildung speziell bei feuchten Hackschnitzeln zu verhindern.

Zur Bestimmung der Höhe der **Durchlassöffnung vom Silo zum Querförderkanal** (Bild 14.2) ist das Fliessverhalten und der Schüttwinkel des Brennstoffes zu berücksichtigen (siehe Bild 14.2)

Bei Hackschnitzeln mit gutem Fliessverhalten (Schüttwinkel rund 45°) kann die Höhe der Durchlassöffnung fest vorgegeben werden. Sie ist so zu wählen, dass sie maximal der Distanz zwischen der siloseitigen Ecke der Durchlassöffnung und dem Beginn des Querförderkanals entspricht, mindestens aber 50 cm beträgt. Damit kann gewährleistet werden, dass keine Hackschnitzel unkontrolliert in den Querförderkanal fliessen und das Querfördersystem überfüllen.

Bei Brennstoffen, deren Fliessverhalten und Schüttwinkel nicht bekannt sind (geschreddertes Altholz, geschreddertes Holz aus der Landschaftspflege, Rinde), ist die Höhe der Durchlassöffnung konstruktiv variabel zu gestalten; beispielsweise mit Holzbohlen, die bei Bedarf entfernt oder eingesetzt werden. Im Praxisbetrieb wird dann die notwendige Höhe bestimmt, bei welcher der Brennstoff einerseits nicht unkontrolliert in den Querförderkanal fliesst und andererseits keine Verpressung erfolgt. Das Verpressen des Brennstoffs an der Tauchwand oder an den Holzbohlen über der Durchlassöffnung kann dazu führen, dass der Brennstoff nicht ausgetragen werden kann.

Problemloses Austragen von Brennstoffen mit ungünstigem Fliessverhalten aus dem Silo lässt sich auch mittels Installation einer Dosierwalze über der Durchlassöffnung erreichen (siehe Bild 6.21).

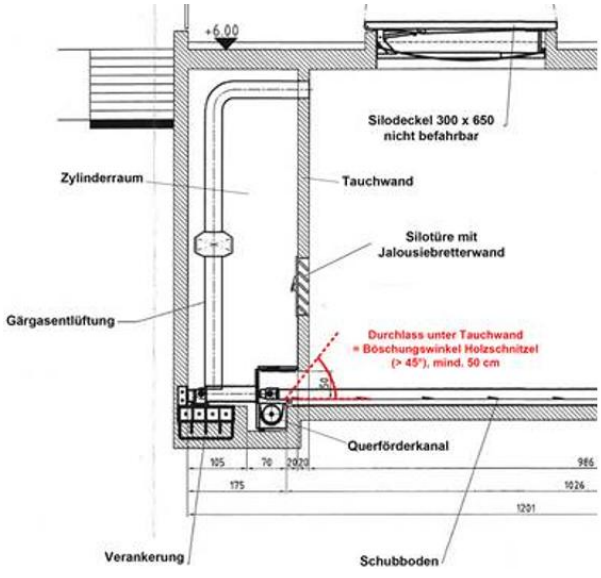


Bild 14.2 Durchlassöffnung vom Silo zum Querförderkanal (Quelle: Holzenergie Schweiz).

Einzelne Hackschnitzellieferanten verfügen neben Containern mit 30 - 40 m^3 Inhalt auch über **Pumpcontainer** mit bis 30 m^3 Inhalt. Mit diesen Pumpcontainern ist eine Beschickung von Qualitäts-Hackschnitzeln trotz ungüns-

tiger Siloraumanordnung möglich. Eine Lösung mit Silodeckeln und einer teuren Ablademulde mit Befüllungsschnecken lässt sich so vermeiden. Beim Pumpen der Hackschnitzel ist jedoch dafür zu sorgen, dass die durch die Hackschnitzelförderung anfallende Transportluft aus dem Silo abströmen kann. Die entsprechende Öffnung ist möglichst bei der Einfüllöffnung vorzusehen. Das Pumpen hat Zusatzkosten zur Folge. Die Füllzeit dauert rund 30 Minuten für 30 Srm.

Muss ein Silo trotz schwieriger Einbringverhältnisse mit Kippfahrzeugen befüllt werden, ist eine Ablademulde ausserhalb des Gebäudes mit einem Schneckenfördersystem notwendig (siehe Bild 6.11).

Mobiler Schnitzelcontainer mit Austragung als Siloersatz
Bei nachträglichem Einbau einer Holzheizungsanlage ist der Bau eines unterirdischen Silos in den meisten Fällen sehr kostenintensiv oder wegen der baulichen Gegebenheiten nicht immer möglich. Hier ist eine Versorgung durch mobile 30-m^3-Container mit eingebauter Schubbodenaustragung denkbar. Ein oder mehrere Container werden auf einem geeigneten Vorplatz oder im Gebäudeinnern an das (gemeinsame) Fördersystem angedockt. Die Verbindung bildet ein fest installierter Querförderer, der die ausgetragenen Hackschnitzel zum Feuerungsbeschickungssystem fördert. Das Antriebsaggregat für den Containerschubboden wird im Heizraum platziert.

Rundsilos
Bei Holzheizwerken mit einer Holzkesselleistung > 5 MW kann die Brennstofflagerung in einer Lagerhalle mit Tagessilo oder in oberirdischen **Rundsilos** mit Fräsown Austragung erfolgen. Um Brückenbildung zu vermeiden, ist die maximale Füllhöhe des Rundsilos in Abhängigkeit der Fliessfähigkeit des Brennstoffes zu begrenzen.

Als Richtwerte gelten folgende maximalen Füllhöhen H_{max}:

- Feuchte Hackschnitzel, geringer Feinanteil, Maximallänge Partikel 200 mm: H_{max} = 1.5 x D (Durchmesser Rundsilo)
- Trockenes, geschreddertes Altholz, geringer Feinanteil, Maximallänge Partikel 200 mm: H_{max} = 1.0 x D (Durchmesser Rundsilo)

Verweilt feuchter Brennstoff über eine längere Zeit im Rundsilo, trocknet er aus und neigt zu starker Brückenbildung. Dadurch reduziert sich die Fliessfähigkeit, und die automatische Austragung des Brennstoffs ist nicht mehr möglich.

14.2.4 Silobelüftung

Silos für trockenen Brennstoff (Späne) werden nicht belüftet. Damit wird verhindert, dass der Brennstoff aus der Luft Feuchtigkeit aufnehmen kann. Bei geschlossenen Silos mit feuchtem Brennstoff muss die erhöhte Luftfeuchtigkeit mittels einer mechanischen Lüftung abgeführt werden. Zudem entstehen bei der Lagerung von feuchten Hackschnitzeln durch Abbauprozesse Gärgase, darunter auch CO_2. Da CO_2 schwerer als Luft ist, breitet es sich am Boden von Brennstofflager, Hydraulikraum und Heizraum aus und sammelt sich an den tiefsten Punkten. Damit für das Wartungspersonal nie eine Erstickungsgefahr besteht, müssen die betroffenen Bereiche mit geeigneten Lüftungseinrichtungen geschützt werden. Die entsprechenden länderspezifischen Sicherheitseinrichtungen und Vorschriften in Kapitel 19 sind zu beachten.

Die Feuchtigkeitsabgabe der Hackschnitzel bewirkt eine hohe relative Luftfeuchtigkeit im Brennstofflager. Diese kondensiert an den kalten Wänden, der Decke und speziell an ungedämmten Silodeckeln und bewirkt eine erneute Befeuchtung des Brennstoffes. Das Fremdwasser auf der Brennstoffoberfläche kann eine starke Schimmelpilzbildung verursachen. Um diese zu verhindern, ist die anfallende Feuchtigkeit durch die Lüftungseinrichtung (gesteuert mit einer Zeitschaltuhr) abzuführen, welche das Silo quer durchlüftet. Die Wände, die Decke und der Deckel des Brennstofflagers können dadurch trocken gehalten werden.

Silobelüftung mit Aussenluft
Aussenluft strömt durch einen Lichtschacht in den Hydraulikraum. Dort wird die Luft in Bodennähe durch eine Lüftungsanlage mechanisch in den Schnitzelsilo gefördert und als Abluft via Silodeckel oder Lichtschacht ins Freie geführt. Die Lüftungsanlage ist bei einer intermittierenden Lüftung auf einen 3- bis 5-fachen stündlichen Luftwechsel des Hydraulikraumes auszulegen, wobei die Lüftung während mindestens 10 Minuten pro Stunde in Betrieb sein muss.

Auf die intermittierende Lüftung kann verzichtet werden, wenn die Lüftung auf einen 20-fachen Luftwechsel pro Stunde ausgelegt ist und 15 Minuten Wartezeit zwischen dem Einschalten der Lüftung und dem Betreten des Raumes eingehalten wird (z. B. mit einer durch Zeitschaltung verriegelten Tür mit Zuhaltung).

Wenn direkte Öffnungen zwischen Hydraulikraum und Silo vorhanden sind, beispielsweise weil der Querförderkanal im Hydraulikraum nicht geschlossen ist, kann ein Kurzschlussluftstrom zwischen Silo und Hydraulikraum entstehen. Damit die Gärgase und die Luftfeuchtigkeit dennoch weggeführt werden, muss im Silo über dem Brennstoff eine zusätzliche Absaugung installiert werden. Damit Aussenluft nachströmt, muss deren Fördervolumen etwas grösser sein als dasjenige der Absaugung im Hydraulikraum.

Speziell sei darauf hingewiesen, dass bei Füllhöhen von über fünf Metern die Gärgase, die sich über dem Schüttgut bilden, kontrolliert abgeführt werden müssen.

Bei kalter Aussenluft und feuchtem Brennstoff können durch Feuchtigkeitsbeschlag im Hydraulikraum und im Lüftungskanalnetz Vereisungsprobleme entstehen.

Kombinierte Heizraum- und Silobelüftung
Die Lüftungseinrichtungen von Heizraum und Silo werden sinnvollerweise kombiniert, weil die warme Luft aus dem Heizraum Vereisungsprobleme im Hydraulikraum

vermindert und den Trocknungsvorgang der Hackschnitzel unterstützt. Die Lüftungsanlage ist bei einer intermittierenden Lüftung auf einen 3- bis 5-fachen stündlichen Luftwechsel des Hydraulikraumes auszulegen, wobei die Lüftung während mindestens 10 Minuten pro Stunde in Betrieb sein muss.

Auf die intermittierende Lüftung kann verzichtet werden, wenn die Lüftung auf einen 20-fachen Luftwechsel pro Stunde ausgelegt ist und 15 Minuten Wartezeit zwischen dem Einschalten der Lüftung und dem Betreten des Raumes eingehalten wird (z. B. mit einer durch Zeitschaltung verriegelten Tür mit Zuhaltung).

Aussenluft strömt durch eine Wetterschutzjalousie in den Heizraum (siehe Bild 13.30). Ein Teil der Luft wird von den Verbrennungsluftgebläsen in die Feuerung geführt, der Rest strömt durch die Brandschutzklappe in den Hydraulikraum. Dort wird die Luft durch eine Lüftungsanlage mechanisch in den Schnitzelsilo gefördert und als feuchte Abluft ins Freie geführt.

Wenn direkte Öffnungen zwischen Hydraulikraum und Silo vorhanden sind, z. B. weil der Querförderkanal im Hydraulikraum nicht geschlossen ist, kann ein Kurzschlussluftstrom zwischen Silo und Hydraulikraum entstehen. Damit die Gärgase und die Luftfeuchtigkeit dennoch weggeführt werden, muss mit einem zusätzlichen Rohrventilator vor der Brandschutzklappe etwas mehr warme Heizraumluft in den Zylinderraum gefördert werden, als der Ventilator im Zylinderraum absaugt.

Wenn der Heizraum deutlich tiefer als der Hydraulikraum und der Silo liegt, muss die Türe zwischen Heizraum und Hydraulikraum absolut dicht sein. Ansonsten besteht vor allem im Schwachlastbetrieb und im Sommer, wenn die Anlage stillsteht, aber noch Schnitzel im Silo sind, die Gefahr, dass sich im Heizraum Gärgase ansammeln.

Wenn das Bodenniveau des Silos tiefer liegt als dasjenige des Heizraums, kann kalte Aussenluft aus dem Heizraum in den Hydraulikraum strömen und den gewünschten Trocknungsvorgang behindern. Dies kann verhindert werden, indem ein zusätzliches Lüftungsrohr mit Rohrventilator warme Luft von der Heizraumdecke direkt via Brandschutzklappe in den Hydraulikraum führt.

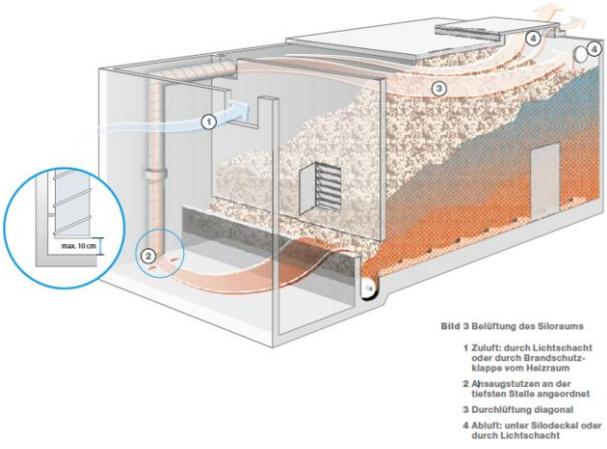


Bild 14.3 Silobelüftung (Quelle: Suva [139]).

Abführen der Siloabluft

Bei der Platzierung der Siloabluftöffnung ist darauf zu achten, dass Gärgase unangenehm riechen. Bei möglicher Geruchsbelästigung empfiehlt es sich, die Siloabluft mit einer separaten Abluftanlage über Dach zu führen.

14.2.5 Auslegung Lagerhalle

Bei kleineren und mittleren Anlagen wird für die Brennstofflagerung in der Regel ein Silo verwendet, bei einer Anlagegrösse > 2 MW ist eine Lagerhalle wesentlich kostengünstiger (Bild 14.4). Bei Anlagen < 2 MW mit direkter Versorgungskette kann der Bau einer Lagerhalle mit einer befahrbaren Lagerfläche, welche zum Teil einen befahrbaren Schubboden aufweist, und mit Tagessilo ebenfalls eine wirtschaftliche Lösung sein, wenn auf ein teures Unterflursilo verzichtet werden kann. Für sehr grosse Holzheizwerke bieten sich für die Brennstofflagerung als Alternative zur Lagerhalle auch oberirdische Rundsilos an.



Bild 14.4 Lagerhalle (Quelle: Holzenergie Schweiz).

Die Bewirtschaftung einer Lagerhalle erfolgt mit folgender Logistik:

- Bewirtschaftung der Lagerhalle und Beschickung von Tagessilo und Schubboden mit Rad- oder Teleskoplader
- Vollautomatisches Kransystem, das über eine Ablademulde und Tagessilo verfügt
- Be- und Entladesystem mit Kratzkettenförderer. Vorsilo mit Kratz- oder Schubboden für die Beladung des Kratzkettenförderers, Austragung des Brennstoffs zum Feuerungsbeschickungssystem mit Schubboden
- Beschickung ab Abwurfmulde mit Schneckenfördersystem, Austragung mit Schubboden
- Einlagerung und Austragung mit Spezialsystem wie Toploader.

Bei Lagerhallen ist auf eine gute Durchlüftung in Form einer Querlüftung zu achten, damit die über dem eingetragenen Brennstoff austretende Feuchtigkeit gut abgeführt wird. Beim Kransystem und beim Be- und Entladesystem mit Kratzkettenförderer ist zusätzlich eine Notbeschickung ins Tagessilo vorzusehen, damit die Holzheizungsanlage beim Ausfall des Hallenbewirtschaftungssystems weiter betrieben werden kann. Beim Kransystem kann der Brennstoff z. B. direkt auf den Schubboden

des Tagessilos abgekippt werden, der den Brennstoff zum Beschickungssystem fördert. Beim Be- und Entladesystem kann der Brennstoff zum Beispiel durch eine Öffnung im Förderkanal des Kratzkettenförderers auf das Beschickungssystem fallen.

14.2.6 Aussenlager

Aussenlager (Freilager) von Hackschnitzeln auf Halden oder von Rundholz auf Poltern bei der Heizzentrale oder an einem zentralen Ort sollten besonnt und ganzjährig anfahrbar sein (Bild 14.5 und Bild 14.6).

Nachteilig für Hackschnitzel sind bei Aussenlagern die erhöhten Energieverluste durch Substanzverlust.

Bei Hackschnitzeln auf Halden, welche mit einem Radlader bewirtschaftet werden, sind Verunreinigungen durch Sand und Steine zu vermeiden. Für die Halden ist ein geteerter Platz mit Entwässerung oder ein verfestigter Platz auf trockenem Untergrund zu realisieren.



Bild 14.5 Aussenlager von Hackschnitzeln auf Halde (Quelle: Holzenergie Schweiz).



Bild 14.6 Freilager von Rundholz auf Polter (Quelle: Holzenergie Schweiz).

Bei der Lagerung von feuchten Brennstoffen wie Hackschnitzeln aus Waldrestholz, Industrierestholz, Holz aus der Landschaftspflege, Durchforstungsholz sowie zerkleinerter oder unzerkleinerter Rinde sind folgende Rahmenbedingungen zu beachten:

- Eine gute Durchlüftung des Brennstoffes auf der Halde wird durch einen geringen Anteil an Feingut inklusive Nadeln, Blättern und Zweigen und durch eine grobe Stückigkeit des Brennstoffes erreicht.
- Ein hoher Feingutanteil und eine kleine Stückigkeit verhindern das gleichmässige Abtrocknen des Brennstoffes und fördern die Bildung von Schimmelpilzen an der Schüttkrone. Das Aufsteigen der Feuchtigkeit wird bei Schichten mit hohem Feingutanteil verhindert, und die abgegebene Feuchtigkeit kondensiert in diesen Schichten wieder aus (speziell an der Schüttkrone).
- Der Abbau von Trockensubstanz im Brennstoff (hohe Abbauwerte bis 4 % pro Monat bei hohem Wassergehalt) lässt sich durch kurze Umschlagszeiten und optimale Trocknung des Brennstoffes mit grober Stückigkeit (gut durchlüftet) reduzieren. Der Hinweis bezieht sich auch auf die Lagerung von Brennstoff in Silos oder Lagerhallen.
- Speziell bei Brennstoffen mit offenporigen Zellen wie Nadelholz kann die Trocknung des Brennstoffes über eine längere Lagerdauer durch das Abdecken der Halden mit Vliesen optimiert werden, welche die Fremdbefeuchtung des Brennstoffes durch Niederschlag bedeutend reduzieren. Nadelholzpolter werden zum Teil mit hackbaren Folien abgedeckt, um die Fremdbefeuchtung zu vermeiden.
- Die Trocknungsrate des Brennstoffs, die bis 10 % Wassergehaltsreduktion während des ersten Monats betragen kann, ist im Sommer und in der Übergangszeit wesentlich höher als in der kalten Winterzeit.

14.2.7 Selbstentzündung und Substanzverluste

Bei der Lagerung grosser Mengen von Hackschnitzeln besteht die Gefahr der Selbstentzündung. Ein erhöhtes Risiko besteht immer dann, wenn mehrere der folgenden Bedingungen gleichzeitig erfüllt sind:

- Besonders lange Lagerdauer (z. B. mehr als 3 Monate)
- Einlagerung bei warmer Witterung (Sommermonate)
- Der Brennstoff ist bei der Einlagerung feucht und eventuell noch grün.
- Der Brennstoff enthält grössere Anteile an Nadeln oder Blättern.
- Der Brennstoff ist zum Teil sehr fein gehackt.
- Der Brennstoff enthält hohe Anteile an frischer Rinde oder feinen Ästen (z. B. nährstoffreiches Kronenmaterial).
- Die Zerkleinerung erfolgte mit Schreddern, oder es werden Hacker mit stumpfen Messern eingesetzt.
- Unterschiedliche Qualitäten (z. B. grob/fein, feucht/trocken, Wipfelholz/Stammholz) werden im gleichen Lager nacheinander eingelagert.
- Der Brennstoff ist inhomogen und wird bei der Einlagerung in verschiedenen Schichten abgelagert (Haufenbildung). Es bilden sich Grenzschichten zwischen den einzelnen Brennstoffen mit unterschiedlicher Qualität oder Herkunft.
- Der Brennstoff wird relativ hoch aufgeschüttet (> 4 m).
- Das Lagergut wird bei der Einlagerung durch Befahren mit Ladefahrzeugen verdichtet.
- Je nach Art der Lagerbewirtschaftung und speziell bei längeren Einlagerungsphasen wird das zuerst eingelagerte Material nicht auch zuerst wieder entnommen. Das heisst, es kommt zu uneinheitlicher Lagerdauer des Brennstoffs.

Neben dem Selbstentzündungsrisiko führen solche Lagerbedingungen auch zu erheblichen – zum Teil aber äusserlich nicht wahrnehmbaren – Energieverlusten durch biologischen Abbau. Bei feucht eingelagertem, feinem Hackgut liegen diese Verluste bei 2 bis 3 Prozent

pro Monat. Daher ist auch aus wirtschaftlichen Gründen von einer Langzeitlagerung von problematischen Hackschnitzeln abzuraten.

Eine Kombination der folgenden Massnahmen zur Vermeidung von Selbstentzündungsbränden sollte daher ergriffen werden:

- Getrennte Lagerung unterschiedlicher Hackgutqualitäten auf eigenen Haufen
- Vermeidung hoher Wassergehalte im Lagergut, indem man das Holz vor dem Hacken antrocknen lässt
- Vermeidung von stumpfen Schneidwerkzeugen oder Schreddern beim Zerkleinern
- Durchgehend möglichst grobe Hackschnitzelstruktur
- Vermeidung von grösseren Anteilen von Nadeln oder Blättern als leicht mikrobiell angreifbare Substanzen
- Kurze Lagerdauer (vor allem bei warmen Aussentemperaturen bei der Einlagerung)
- Guter Luftzutritt (Wärmezufuhr und Feuchteabfuhr)
- Schütthöhe < 4 m (möglichst als Spitzkegel oder -haufen ausgeformt)
- Geringer Lagerquerschnitt bei Aussenlagern (Mietenbreite < 6 m)
- Langzeitlagerung vermeiden (auch wegen Brennstoffverlusten)
- Gegebenenfalls aktive Trocknung oder Belüftungskühlung
- Verwendung von Temperatursonden zur Überwachung (geeignet sind beispielsweise Sonden, die auch zur Überwachung von Heustöcken eingesetzt werden).
- Mindestabstand zu Gebäuden oder anderen Lagern sowie maximale Lagermenge beachten.

Vorbeugender Brandschutz

Bei der Brennstofflagerung ist erhöhte Aufmerksamkeit auf den vorbeugenden Brandschutz zu legen, und die jeweils gültigen Brandschutzbestimmungen sind grundsätzlich einzuhalten. Die zuständige Feuerwehr kennt die örtlichen Gegebenheiten, und es sollten gemeinsam erstellte Einsatzpläne vorliegen.

Wenn das Lager zur Brandbekämpfung geöffnet oder abgetragen wird, kann der Sauerstoffzutritt zu einem offenen Brand führen.

14.2.8 Auslegung Spänesilo

Die Silogrösse wird anhand der Bilanz des monatlichen Energieholzbedarfs und der monatlichen Restholzproduktion festgelegt. Dabei hat ein Spänesilo die Funktion eines Brennstoffdepots und wirkt gleichzeitig als Puffer zur Aufnahme des Materialzuflusses. Die Planerin und der Planer müssen klären, wie viel Restholz in einem gewissen Zeitraum anfällt und welcher Anteil davon als Energieholz verwertet werden kann. Überschüssiges Restholz kann an Dritte geliefert werden. Geeignete Formen sind runde oder quadratische Silos.

Zu beachten sind die Anforderungen an die bauliche Gestaltung und den Betrieb entsprechend den gültigen Empfehlungen und Vorschriften (siehe Kapitel 19), insbesondere:

- Brand- und Explosionsschutz
- Sicherheitsbestimmungen, damit Personenunfälle verhindert werden können und Personen mit entsprechender Schutzausrüstung die Silobewirtschaftung ungefährdet vornehmen können
- Vorgehensweise bei Störungen und deren Beseitigen
- Notaustragungssystem

14.2.9 Auslegung Pelletlager

In der Lagerraumbroschüre «Empfehlungen zur Lagerung von Holzpellets» [67] werden die folgenden Anforderungen an die bauliche Gestaltung und den Betrieb eines Pelletlagers ausführlich beschrieben:

- Fachgerechte Anlieferung und Einbringung der Pellets
- Anordnung Prallschutzmatte
- Eigenschaften wie trockener Lagerraum (kein Eindringen von Feuchtigkeit), staubdichte Wände und Wanddurchführungen, statische Anforderungen, Explosionsschutz usw.
- Lagervolumen beziehungsweise Fassungsvermögen in Abhängigkeit von der Nennleistung der Pelletkessel
- Austragungssystem in Abhängigkeit von der Nennleistung der Pelletkessel
- Lagerraumbelüftung zur Verhinderung von hohen CO-Konzentrationen respektive der Vermeidung von Personengefährdung
- Pelletlager über 50 m³ müssen mit einer ins Freie führenden Tür ausgestattet sein
- Lagerraumreinigung
- Übergabeprotokoll Pelletlager.

Im Weiteren sind Sicherheitsbestimmungen aufgeführt, welche beim Betreten des Pelletlagers zu beachten sind, damit Personenunfälle durch giftige CO-Konzentrationen verhindert werden können.

Die Pelletlager haben die örtlich geltenden Vorschriften und Richtlinien bezüglich Brandschutzes, Unfallverhütung und anderes mehr einzuhalten (siehe Kapitel 19).

14.3 Auswahl und Dimensionierung der Brennstoffförderung

14.3.1 Allgemeine Bemerkungen

Die geeignete Wahl und Dimension der Brennstoffförderung ist abhängig vom Brennstoffsortiment und dessen Fliessfähigkeit. Diese wird bestimmt durch die Partikelgrösse (Stückigkeit), den Wassergehalt, den Feinanteil und die Aufbereitungstechnik. Bei gehacktem Brennstoff werden Schnittflächen erhalten, während sich bei geschreddertem Brennstoff Bruchflächen ergeben. Die Wahl des Austragungs- und Brennstofftransportsystems

in Abhängigkeit des Brennstoffsortiments und der Art des Brennstofflagers ist in Tabelle 14.2 ersichtlich.

Eine hohe Fliessfähigkeit weisen Pellets oder trockene Qualitäts-Hackschnitzel mit geringem Feinanteil auf.

14.3.2 Brennstoffförderung

Die Planung kann und soll Einfluss auf die Dimensionierung der Austragungs- und Fördereinrichtungen nehmen, indem sie das Fördersystem und dessen Dimensionierung auf die geforderte Betriebssicherheit beim vorgegebenen Brennstoffsortiment überprüft.

Das Förderprinzip hängt vom Brennstoff ab. Grösse und Dimension der Fördereinrichtungen bestimmt in der Regel der Feuerungslieferant anhand der Kesselleistung und der Silogrösse. Die Planerin oder der Planer haben jedoch einen entscheidenden Einfluss auf die Anordnung von Silo und Kessel. Neben der Forderung, dass Brennstofflager und Kessel möglichst nahe beieinanderliegen sollen, ist bei Mehrkesselanlagen zu beachten, dass jede Feuerungseinheit eine eigene Transportanlage erhält. Die Zugänglichkeit zu Kessel, Flugascheabscheider, Feinstaubfilter und Kamin darf durch die Fördereinrichtungen nicht beeinträchtigt werden.

14.3.3 Austragung

Siloaustragung

Für feuchte Waldhackschnitzel, Hackschnitzel aus Sägeindustrie und Rinde wird ein Silo mit Schubbodenaustragung empfohlen. Der Schubboden ist unempfindlich gegenüber Brennstoffteilen mit Übergrösse und Fremdstoffen wie Steinen. Die Dimensionierung des Schubbodens (insbesondere Schubstangen und Hydraulikzylinder) muss auf die maximal mögliche beziehungsweise zulässige Schütthöhe ausgelegt sein und ist von der Planerin/dem Planer vorzugeben und zu überprüfen.

Für Spänesilos in runder und quadratischer Form eignen sich Zentrumsschnecken, die den Brennstoff ins Zentrum fördern, wobei bei geringem Silodurchmesser auch die kostengünstige Konusschnecke eingesetzt wird. Bei rechteckigen Silobauformen wird eine Pendelschnecke oder ein Schubboden für die Siloaustragung eingesetzt.

Austragung aus Pelletlager

Die Austragung aus dem Pelletlager erfolgt oft mit einer Mittelschneckenaustragung in Verbindung mit einem Schrägboden (bei kleiner Lagerkapazität) oder mittels Federkernaustragung, Knickarm-Raumaustragung (bei grosser Lagerkapazität). Der Lagerraum muss auf einfache Weise möglichst vollständig befüllt und möglichst vollständig entleert werden können. Toträume sind so klein wie möglich zu halten. Pneumatische Absaugsysteme werden für Anlagen < 50 kW eingesetzt.

Tabelle 14.2 Wahl des Brennstofflagertyps in Abhängigkeit des Brennstoffsortiments, des Brennstoffaustragungs- und -transportsystems.

Brennstoffsortiment	Brennstofflagertyp	Austragungssystem	Brennstofftransportsystem	Feuerungsbeschickungssystem
Pellets	Geschlossener Pelletlagerraum Absolut trocken Rundsilo oberirdisch	Mittelschneckenaustragung Federkernaustragung Knickarmaustragung Zentrumsaustragung Schubbodenaustragung	Förderschnecke	Stokerschnecke
Qualitäts-Hackschnitzel	Unterflursilo Oberirdisches Silo	Federkernaustragung Knickarmaustragung Zentrumsaustragung Schubbodenaustragung	Förderschnecke	Stokerschnecke
Hackschnitzel bis P45S-M55+	Unterflursilo Rundsilo oberirdisch Lagerhalle mit Tagessilo	Schubbodenaustragung Frässchneckenaustragung	Förderschnecke Kratzkettenförderer Querschubboden Hydraulischer Schubförderer	Stoker- und Doppel-Stokerschnecke Einschieber Direkteinschieber
LH, DH, RZ, Ruz Altholz bis P63 M55+	Lagerhalle mit Tagessilo, Rundsilo oberirdisch	Schubbodenaustragung Frässchneckenaustragung	Kratzkettenförderer Querschubboden Hydraulischer Schubförderer	Einschieber Direkteinschieber
RHH	Runde oder quadratische Silos	Konusaustragung Zentrumsaustragung Schubbodenaustragung Frässchneckenaustragung	Förderschnecke	Stokerschnecke

* Maximallänge Partikel 200 mm

14.3.4 Brennstofftransportsysteme

Pneumatische Förderung

Die Förderung von Staub, Spänen, trockenen Hackschnitzeln und Pellets ist sowohl pneumatisch als auch mechanisch möglich. Bei pneumatischen Einrichtungen übernehmen Gebläse die Förderung, bei mechanischen

Einrichtungen kommen Schneckenförderer zum Einsatz. Wenn es die bauliche Situation erlaubt, zum Beispiel bei kurzen Transportverbindungen, sind mechanische Transportsysteme den pneumatischen vorzuziehen. Vorteile der mechanischen Förderung sind, dass sie

- weniger störungsanfällig sind,
- weniger Antriebsenergie benötigen und
- kostengünstiger sind.

Schneckenförderung
Das Einsatzgebiet der Schneckenförderung ist auf folgende maximale Brennstoffabmessungen begrenzt:

- Die maximale Brennstofflänge entspricht dem Durchmesser der Schnecke.
- Die maximale Brennstoffdicke ergibt sich aus dem Spiel zwischen Schneckendurchmesser und Nennweite des Förderkanals respektive Nennweite des Schneckenführungsrohrs.

Sehr biegsamer Brennstoff, der sich auf der Schneckenseele aufwickeln kann (zum Beispiel frische lange Rindenteile oder lange Reduzierspäne), kann bei der Schneckenförderung Probleme verursachen. Brennstoffe mit schlechtem Fliessverhalten, wie zum Beispiel grob geschreddertes Landschaftspflegeholz, können an den Übergabestellen durch Brückenbildung Förderprobleme verursachen.

Kratzkettenförderer oder Schubsystem
Brennstoffe mit grosser Stückigkeit (sehr lang oder dick) sowie Brennstoffe mit schlechtem Fliessverhalten sind mittels Kratzkettenförderer oder Schubsystem zu fördern.

14.3.5 Feuerungsbeschickung

Schneckenförderer
Siehe weiter oben in Kapitel 14.3.4. Doppelförderschneckenkanäle mit grosser Nennweite ermöglichen auch die Förderung von langen Brennstoffabmessungen mit kleinerem Durchmesser der einzelnen Förderschnecken.

Hydraulischer Einschieber, Direkteinschiebersysteme oder Schubsendersysteme
Einschieber erlauben die Förderung von sehr langen Brennstoffabmessungen mit einer Endstücklänge bis 100 cm in den Feuerraum.

Eine zusätzliche Schneidkante am Direkteinschiebersystem oder Schubsendersystem kann Brennstoffteile mit Überlänge abschneiden. Vorteilhaft sind zwei Schneidkanten, welche mit einer Entlastungszone voneinander getrennt sind, um den elektrischen Energiebedarf für das Hydraulikaggregat des Einschiebersystems bedeutend zu reduzieren. Rinde ab Lochrotor mit Rindenabschnitten bis 80 cm kann ohne Vorzerkleinerung in die Feuerung gefördert werden. Altholz mit hohem Fremdmaterialanteil (Steine, Metalle usw.) verursacht einen hohen Verschleiss der Einschiebevorrichtung.

Der Verschleiss der Einschiebevorrichtung beim Beschicken der Feuerung mit Altholz kann durch das Vorabscheiden des Fremdmaterialanteils wesentlich reduziert werden.

Hinweis Rückbrandgefahr

Damit ein Rückbrand in den Einschubkanal verhindert werden kann, ist der Holzkessel bei einer minimalen kontinuierlichen Lastabnahme zu betreiben, welche einen kontinuierlichen Brennstoffeinschub ermöglicht.

Folgende Richtwerte für eine notwendige minimale kontinuierliche Lastabnahme gelten:

- feuchter Brennstoff > M40: 20 % der Kesselnennleistung
- trockener Brennstoff < M40: 30 % der Kesselnennleistung.

Ein Schwachlastbetrieb unter der erforderlichen minimalen kontinuierlichen Lastabnahme ist ausgeschlossen.

Einschieber werden hauptsächlich bei Feuerungen für Sägerestholz mit Rinde oder Holz aus Landschaftspflege eingesetzt. Für trockene Späne und Staub müssen Einschieber wegen der Rückbrandgefahr mit einem zusätzlichen Brandschutzschieber im Fallschacht ausgerüstet sein, der bei Stromausfall automatisch schliesst.

14.4 Auswahl und Dimensionierung der Entaschung

Die Aschelogistik für das Heizwerk mit dem Ziel einer wartungsarmen, einfachen, vorschriftsgemässen und staubfreien Ascheentsorgung ist bereits in der Planungsphase detailliert festzulegen.

Beim Verbrennungsvorgang fallen folgende Aschefraktionen an (Bild 9.1):

- Grobasche (Rostasche, Kesselasche, Bettasche)
- Zyklonflugasche (Zyklonasche und Flugasche)
- Feinstflugasche (Filterasche).

Aschelagerung im Heizwerk
Die Zwischenlagerung der anfallenden Asche für den Ascheabtransport kann zum Beispiel durch Aschebehälter oder Aschebunker erfolgen:

- Aschebehälter in einer Grösse von 240 l, 400 l, 600 l, 800 l, 1’000 l werden zum Beispiel angeordnet als «Aschebehälter-Bahnhof»
- Ein trockener Aschebunker, welcher im Bauwerk des Heizwerkes integriert ist (keine Zwischenlagerung von grossen Schlackenteilen möglich, Ascheabtransport mit einem Transportfahrzeug mit aufgebautem Ascheabsaugsystem)

Weitere Möglichkeiten zur Aschelagerung sind:

- Mulden oder spezielle «Roll on-Roll off»-Container im Heizwerk oder im Freien
- Big Bags.

Entaschungsfördereinrichtungen
Die Beförderung der Grobasche zum Aschebehälter oder -bunker erfolgt durch mechanische Ascheaustragungssysteme mit Förderschnecken mit einer maximalen Steigung von 45° ohne Zurückfliessen der Asche im

Schneckenkanal, Schubstangen-, Kratzketten-, Trogketten-, Becherförderer oder Nassentaschung mit Kratzkettenförderer.

Die Beförderung der Zyklonflugasche und der Feinstflugasche zum Aschebehälter oder Aschebunker kann mit einer Förderschnecke mit maximaler Steigung von 45° oder mit einem pneumatischen Aschesaugsystem erfolgen, wobei zu beachten ist, dass mechanische Entaschungs-Fördereinrichtungen gegenüber den pneumatischen folgende Vorteile aufweisen:

- Geringere Störungsanfälligkeit (Fremdteile, Schlackenteile, Glutpartikel)
- Geringerer Hilfsenergiebedarf
- Geringere Lärmemissionen
- Kein Verschleiss von Rohrbögen.

Bei schlackenreicher Asche oder Asche mit hohem Fremdanteil an Steinen, Sand und anderen unterliegen Förderschnecken einer hohen Abnützung. Bei langen Transportdistanzen sollten Schubstangen-, Kratzketten-, Trogketten- oder Becherförderer zum Einsatz gelangen.

Der Transportweg des Ascheaustragungssystems zum Aschebehälter, Aschebunker oder aus der Heizzentrale in die Mulde respektive in die «Roll on-Roll off»-Container ist staubdicht und robust mit möglichst kurzer, einfacher Anordnung (linear) auszuführen.

Eine gute Zugänglichkeit über Wartungsöffnungen ermöglicht es, Störungen problemlos zu beheben und Wartungsarbeiten bequem auszuführen.

Bei Ascheaustragungssystemen, welche zu einer Mulde respektive einem «Roll on-Roll off»-Container im Aussenbereich führen, ist mit Lärmschutzmassnahmen die Lärmbelastung auf das geforderte Niveau zu reduzieren.

Pneumatische Entaschungs-Fördereinrichtungen können bei langer Distanz oder komplizierter Anordnung des Transportwegs zum Einsatz gelangen. Dabei ist zu beachten, dass pneumatische Systeme nur bei schlackenfreier Asche und Asche ohne Fremdanteil eingesetzt werden können, zum Beispiel bei Elektro- oder Gewebefiltern.

Ascheabtransport

Aufgrund der vorgegebenen Entsorgungslogistik (siehe Kapitel 9) ist zu entscheiden, ob die verschiedenen Aschefraktionen getrennt oder ungetrennt zwischenzulagern sind. Dabei ist auch eine zukünftige Verwertung gewisser Aschefraktionen zu berücksichtigen, indem Vorkehrungen für eine nachträgliche Trennung getroffen werden.

Bei Grossanlagen > 2 MW Holzkesselleistung ist der Ascheanfall automatisch in Mulden oder «Roll on-Roll off»-Container für Lastwagen zu fördern. Die Aufnahme des Aschebehälters auf das Transportfahrzeug hat auf einfache Weise zu erfolgen. Eine unkomplizierte Wechselvorrichtung (z. B. Mulden auf Schienen verschiebbar) zum bereitstehenden Ersatz-Aschebehälter ermöglicht einen Ascheabtransport mit geringem Aufwand (siehe Bild 14.7).



Bild 14.7 Wechselvorrichtung Aschemulden (Quelle: AEE INTEC).

Bei mittleren Holzkesselanlagen < 2 MW Gesamtleistung sollen idealerweise die Aschebehälter direkt aus der Heizzentrale ins Freie gefahren werden können, damit sich teure Hilfseinrichtungen wie hydraulischer Aschecontainerlift, Hebebühnen, Aufzugsvorrichtungen oder pneumatische Fördereinrichtung vermeiden lassen.

Bei der Projektierung der Ascheentsorgung sind auch die einfache Aufnahme des Aschencontainers auf ein Transportfahrzeug und die Staubentwicklung beim Entleeren der Aschencontainer in einen Kehrichtwagen zu beachten. Zur Vermeidung der Staubentwicklung kann ein reissfester, verschliessbarer Sack in den leeren Container gelegt werden, der vor dem Entleeren verschlossen wird. Glutfreie Asche kann in Einweg-Bigbags abgefüllt, transportiert und deponiert werden.

An Bedeutung gewinnt bei mittleren Anlagen der Ascheabtransport mit einem Transportfahrzeug mit aufgebautem Ascheabsaugsystem (Bild 14.8). Dies ermöglicht ein einfaches Aschehandling in der Heizzentrale. Das Rohr für den Aschetransport von der Heizzentrale bis ins Freie (Anschlussstutzen Transportfahrzeug) wird in der Regel als fixe Installation ausgeführt (Potenzialausgleich beachten).



Bild 14.8 Transportfahrzeug mit aufgebautem Ascheabsaugsystem (Quelle: Holzenergie Schweiz).

15 Ausführung und Abnahme der Holzkesselanlage

15.1 Allgemeine Anforderungen und Definition der wichtigsten Begriffe

Die Ausführung und Abnahme der Wärmeverteilung sind im Planungshandbuch Fernwärme beschrieben [19]. Im Folgenden sollen die Ausführung und Abnahme der Holzkesselanlage thematisiert werden. Die aktuellen Vorschriften der Länder sind zu beachten; sie können ebenso wie projektspezifische vertragliche Vereinbarungen zu Abweichungen von den nachfolgend beispielhaft aufgeführten Anforderungen und Abläufen führen.

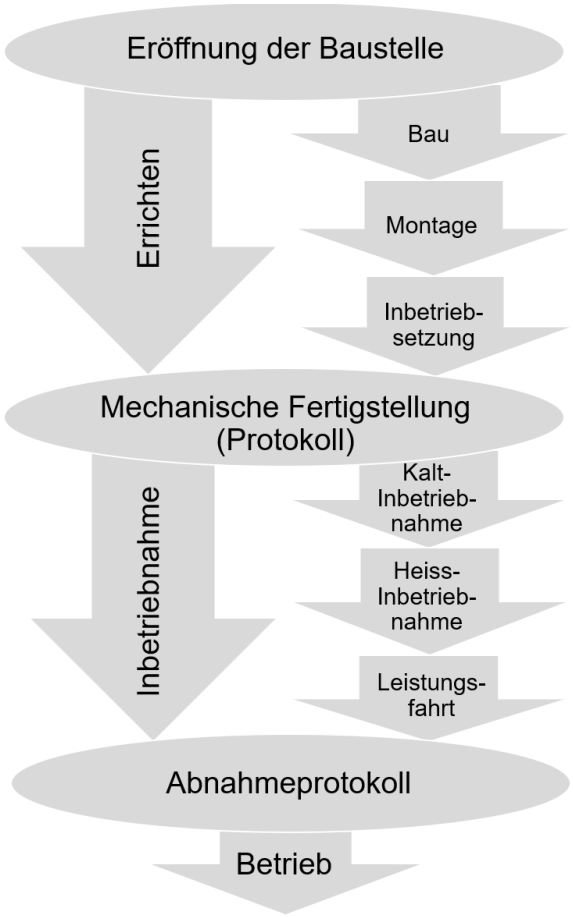


Bild 15.1 Errichten, Inbetriebnahme und Betrieb einer Anlage (auf Basis von [140] selbst erstellt).

Bild 15.1 zeigt die üblichen Projektphasen: Errichten, Inbetriebnahme und Betrieb. Mit der Baustelleneröffnung beginnt das **Errichten der Anlage**, also Bau und Montage. Anschliessend werden Sicherheits- und Funktionsprüfungen durchgeführt, diese können mit der Inbetriebnahme von Infrastruktur und Nebenanlagen verbunden sein und werden in ihrer Gesamtheit auch als Inbetriebsetzung bezeichnet. Die Protokollierung der sogenannten mechanischen Fertigstellung markiert das Ende der Inbetriebnahmevorbereitungen, nun geht es an die eigentliche **Inbetriebnahme**. Mit der Kalt-Inbetriebnahme wird die Betriebsbereitschaft so weit hergestellt, dass die Anlage angefahren werden kann. Während der anschliessenden Heiss-Inbetriebnahme läuft die Anlage erstmalig unter Betriebsbedingungen. Ziel des nun folgenden Probebetriebes ist es, die Anlage so zu justieren, dass sie die vereinbarten Parameter erreicht und sich als nutzungsfähig für den Dauerbetrieb erweist. Den Leistungsnachweis mit Abnahmemessungen soll die Leistungsfahrt liefern, die auch als Abnahmeversuch bezeichnet wird. Die Leistungsfahrt endet mit der Unterzeichnung des **Abnahmeprotokolls** durch die Vertragspartner. Die Anlage geht nun in den kommerziellen Betrieb (Dauerbetrieb) über [140].

Mit der Inbetriebnahme setzt jedes Unternehmen sein Anlagenteil gemäss Werkvertrag in Betrieb. Die Inbetriebnahme der einzelnen Anlagenteile hat entsprechend den allgemein gültigen Vorschriften zu erfolgen. Sind mehrere Anlagenteile gemeinsam in Betrieb zu nehmen, hat die Bauüberwachung (Bauleitung), in Rücksprache mit den einzelnen Unternehmern, den Zeitablauf der einzelnen Inbetriebnahmen mit einem Terminplan zu koordinieren. Für die Inbetriebnahme der einzelnen Anlagenteile ist das jeweilige Unternehmen verantwortlich.

Jedes Anlagenteil wird gemäss Werkvertrag einzeln abgenommen. Für die Durchführung der Abnahme ist die Bauüberwachung verantwortlich. Bei erfolgreicher Abnahme erfolgt die Übergabe des durch das Unternehmen erstellten Anlagenteils an die Bauherrschaft.

Die Übergabe der gesamten Anlage an die Bauherrschaft ist abgeschlossen,

- wenn alle Anlagenteile gemäss Werkvertrag abgenommen und nachträgliche Mängelbehebungen ausgeführt wurden und
- wenn die Bauüberwachung die vollständig nachgeführte Gesamtanlagendokumentation an die Bauherrschaft übergeben hat.

15.2 Bauüberwachung

Die Bauüberwachung, auch Bauleitung oder Fachbauleitung genannt, muss von einer erfahrenen und fachkundigen Person durchgeführt werden. Dies sind Aufgaben der Bauherrschaft und daher von dieser zu organisieren. In der Regel wird die Bauaufsicht von der Bauherrschaft an die Planerin oder den Planer übergeben. Sie dient insbesondere der Kontrolle der termin- und fachgerechten Ausführung der Gewerke durch die einzelnen Gewerklieferanten sowie der übergeordneten Baukoordination. Es wird empfohlen, genaue Vereinbarungen zu treffen, welche

qualitätssichernden Massnahmen seitens der Hersteller und welche seitens der Bauaufsicht durchgeführt werden.

Die Bauüberwachung hat in maximal einwöchigen Abständen Baubesprechungen abzuhalten, an denen alle zu diesem Zeitpunkt am Projekt tätigen Anlagelieferanten teilzunehmen haben. Darin sind der aktuelle Projektstand, die Schnittstellen zwischen den einzelnen Anlagelieferanten, der Terminplan und Allfälliges zu besprechen. Es sind Protokolle über alle Besprechungsinhalte zu verfassen und an alle Beteiligten zu versenden.

Von der Bauüberwachung sind von Anlagelieferanten rechtzeitig auch diejenigen Daten anzufordern, welche für andere Anlagelieferanten von wesentlicher Bedeutung für deren Ausführung sind.

Zu den Aufgaben der Bauüberwachung zählt, dass die Montagearbeiten der Anlagelieferanten entsprechend den Werkverträgen ausgeführt werden. Dies gilt insbesondere für die Vollständigkeit, den fachgerechten Einbau und die Ausführung, die Arbeitssicherheit und die Sauberkeit. Die Qualität der Montage, die laufende Dokumentation und die qualitätssichernden Massnahmen der Hersteller sind regelmässig zu kontrollieren und zu dokumentieren (z. B. Schweissnähte, Dichtigkeit, Verdrahtung, Drehrichtung, Montage entspricht Plänen und Fliessschemata).

Die Bauüberwachung hat regelmässig die Bauherrschaft über den aktuellen Projektstand zu informieren.

15.3 Kritische Punkte während der Bauphase

Im Folgenden werden einige während der Bauphase kritische Punkte beispielhaft behandelt.

Setzen der Silo-Einlegeteile

Bereits in einer frühen Bauphase müssen Verankerungsprofile und Führungsschienen für die Siloaustragung gesetzt werden. In der Regel erstellt der Statiker die für den Silobau notwendigen Schalungs- und Armierungspläne und integriert dabei die statischen Elemente des Austragungssystems. Die Planerin oder der Planer koordiniert die Lieferung von Bauunternehmen und Anlagelieferanten und überprüft die Silopläne der Statikerin oder des Statikers.

Die Einlegeteile der Siloaustragung werden vom Anlagelieferanten gesetzt. Er stimmt den Montagezeitpunkt mit dem Bauunternehmen ab. Gerade in dieser anspruchsvollen Ausführungsphase soll die Planerin oder der Planer das richtige Zusammenwirken zwischen Bauunternehmen und Anlagelieferant vor Ort sicherstellen.

Festlegung von Rohrdurchführungen

Die genauen Positionen der Rohrdurchführungen von Fernwärme-, Daten-, Wasser-, Abwasser-, Telefon-, Strom- und allenfalls Öl- und Gasleitungen sollte die Planerin oder der Planer dem Bauunternehmen bei der Fundamentierung bekannt geben, damit die Leitungseintritte nicht an später ungünstigen Stellen positioniert sind. Voraussetzung ist, dass die fortführende Planung dieser Leitungen im Heizhaus zu diesem Zeitpunkt bereits erfolgt ist.

Berücksichtigung von Erdungsbändern für Potenzialausgleich und Blitzableitung

Ebenfalls bereits in der Fundamentierungsphase muss in Abstimmung mit dem Bauunternehmen die Einlegung von Erdungsbändern, die Ableitung dieser ins Erdreich sowie die Anschlussmöglichkeiten für Potenzialausgleiche der Maschinen und der Blitzableitung erfolgen. Häufig kann es vorkommen, dass zu diesem Zeitpunkt die Elektroarbeiten noch nicht fix vergeben sind und die Bauunternehmung daher diese Arbeiten durchzuführen hat oder ein Elektrounternehmen für diese Arbeiten beauftragt. Grundsätzlich bietet sich an, dass diese Arbeiten bereits in der Ausschreibung für die Bautätigkeiten enthalten sind.

Einbringung grosser Anlagenteile

Die Einbringung grosser Anlagenteile ist rechtzeitig mit dem Baufortschritt des Hochbaus zu planen. Dabei sind entsprechende Öffnungen für die Montage freizuhalten, falls die Tore und Türen nicht die entsprechenden lichten Weiten für die Montagen aufweisen (z. B. Dachöffnungen, Wandöffnungen). Eine ungeeignete Montagemöglichkeit für Anlagenteile könnte zu teilweisen Demontagen oder Wandschnitten führen, welche zu Verzögerungen und jedenfalls unerwarteten Kosten für die Bauherrschaft führen können.

Anbringung von Montagehilfen

Oftmals werden für die Montage schwerer Anlagenteile temporäre Montagehilfen und Hebezeuge von den Lieferanten eingesetzt, z. B. Lastzüge, welche an der Decke befestigt werden. Derartige Einrichtungen sind rechtzeitig einzuplanen, da sie Auswirkungen auf die Statik des Gebäudes haben können und bei der Dimensionierung berücksichtigt werden müssen.

Es sollte in diesem Zusammenhang auch immer geprüft werden, ob Montagehilfen und Hebezeuge eventuell dauerhaft eingebaut werden, damit sie auch für spätere Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten zur Verfügung stehen.

15.4 Inbetriebsetzung und Inbetriebnahme

15.4.1 Vorbereitungen für die Inbetriebnahme, Kalt-Inbetriebnahme

Für die Inbetriebnahme sind nach Montageende der Neuanlage Vorbereitungen im Zuge der sogenannten Inbetriebsetzung zu treffen [140]:

- Grundreinigung,
- Sicherheits- und Funktionsprüfungen, Dichtigkeitsprüfungen,
- Inbetriebnahme von Nebenanlagen und Infrastruktur.

Die Funktionskontrolle der einzelnen Anlagenteile erfolgt meist durch den Heizkesselhersteller, dazu zählen auch alle elektrischen Antriebe und die MSR-Technik. Nach der Protokollierung der mechanischen Fertigstellung geht es an die Kalt-Inbetriebnahme, mit welcher die Betriebsbereitschaft der Anlage hergestellt wird. Mit einem Protokoll wird die Betriebsbereitschaft angezeigt.

In der Praxis ergeben sich bei Holzfeuerungsanlagen während dieser Vorbereitungsphasen einige wesentliche Aspekte:

- Das erstmalige Einfeuern der Holzkesselanlage erfordert trockenen Brennstoff, damit die Ausmauerung des Feuerraums vollständig ausgetrocknet werden kann. Die Anforderungen an den Brennstoff bezüglich Menge und Qualität sind mit dem Anlagelieferanten abzusprechen.
- Das Brennstoffsilo soll zunächst maximal zu einem Drittel befüllt werden. Falls Probleme mit dem Austragungssystem auftreten, muss nicht der gesamte Siloinhalt über die Einfüllöffnung entleert werden.
- Um Brückenbildung vorzubeugen, soll vor der ersten Füllung genügend Zeit zur Austrocknung des Silobetons eingerechnet werden. Eine zweiwöchige Trocknungsphase gilt dabei als Minimum. Vor dem Füllvorgang sind Funktion und Ausführung des Austragungssystems sowie die Oberflächengüte des Silobodens durch den Anlagelieferanten zu prüfen. Dieser gibt anschliessend der Bauleitung die Freigabe zur Erstfüllung. Vor der Füllung ist im Siloinnern eine Baureinigung durchzuführen.
- Damit die Wärmeerzeugeranlage in Betrieb genommen werden kann, muss sichergestellt sein, dass eine ausreichende Wärmeabnahme vorhanden ist.
- Es ist Aufgabe der Bauleitung, in Rücksprache mit den Anlagelieferanten die Anwesenheit der einzelnen Unternehmen zeitlich zu koordinieren.

Checkliste Vorbereitung Inbetriebsetzung

- Heizsystem und Expansionsgefäss gefüllt (Wärmeabgabe betriebsbereit)?
- Verrohrung richtig ausgeführt?
- Kesselpumpe funktionstüchtig?
- Verbrennungsluft- und Abgasventilatoren funktionstüchtig?
- Rücklaufhochhaltung betriebsbereit?
- Fühlerplatzierung richtig?
- Sicherheitsthermostat richtig eingestellt?
- Sicherheitsventil montiert?
- Thermische Ablaufsicherung funktionsfähig?
- Rohrleitungsanschlüsse, Rückbrandsicherung installiert und betriebsbereit?
- Elektrische Anschlüsse inkl. Sicherheitskette auf Funktionstüchtigkeit überprüft?
- Abgasreinigung, Kamin und Kaminanschluss in Ordnung?
- Fördersysteme (Brennstoff, Asche) auf Funktion überprüft?
- MSR, Schnittstellen, Kommunikation, Visualisierung und gegebenenfalls Datenaufzeichnung funktionstüchtig?

15.4.2 Heiss-Inbetriebnahme der Anlage

Voraussetzung für die Heiss-Inbetriebnahme der Heizkesselanlage, die auch als Warm-Inbetriebnahme bezeichnet wird, sind die abgeschlossene Funktionskontrolle und die Inbetriebnahme der Anlagenteile, welche nicht im Lieferumfang des Anlagelieferanten enthalten, aber zum Betrieb der Heizkesselanlage erforderlich sind. Die Heiss-Inbetriebnahme der Anlage erfolgt mit dem erstmaligen Einfeuern der Holzkesselanlage (Anfahren), wobei das gleichzeitige Zusammenspiel aller Anlagenteile unter Anwendung der automatischen Anlageregelung erfolgen muss. Als Erstes wird die Feuerraumauskleidung entsprechend den Vorgaben des Herstellers ausgetrocknet. Anschliessend wird in Stufen die Feuerungsleistung hochgefahren. In dieser Phase sollen die Bauüberwachung, das spezialisierte Inbetriebnahmepersonal und das Fachpersonal aller relevanten Gewerke (Heizkesselhersteller, Anlagebauer, Installateur/in, Elektroinstallateur/in, Regelungstechniker/in) sowie das zukünftige Betriebspersonal anwesend oder kurzfristig verfügbar sein. Die eingeplante Zeit für diese Phase soll ausreichend bemessen werden. Je nach Anlagegrösse sind ein ganzer Tag bis mehrere Tage vorzusehen. Die Heiss-Inbetriebnahme wird häufig als Probebetrieb bezeichnet [140].

In der Heiz- und Kraftwerkstechnik kann unter dem Probebetrieb auch eine gesonderte Betriebsphase zwischen Heiss-Inbetriebnahme und Dauerbetrieb verstanden werden [140]. Sie kann bei Holzheizkesselanlagen beginnen, sobald

- die Anlage im automatischen Betrieb und unter Berücksichtigung aller Sicherheitstests (z. B. Sicherheitstemperaturbegrenzer, thermische Ablaufsicherung) betrieben werden kann;
- die Heizkesselanlage für den Probebetrieb einreguliert ist und eventuell der Betrieb mit verschiedenen Brennstoffmischungen getestet worden ist;
- die erstmalige Einweisung des Betriebspersonals mit Betriebshandbuch erfolgt ist.

Während des Probebetriebs, der unter anderem abhängig von Anlagegrösse und Komplexität einige bis mehrere Tage dauern kann,

- wird die Anlage optimal einreguliert,
- sind wesentliche Mängel zu beheben,
- ist ein ununterbrochener störungsfreier Betrieb der Anlage unter Aufsicht und in Verantwortung des Anlagelieferanten nachzuweisen.

Auch sollten während des Probebetriebes bereits die Betriebsdaten aufgezeichnet und ausgewertet werden, damit Unregelmässigkeiten im Anlagenbetrieb rechtzeitig vor der Abnahme erkannt und gelöst werden können.

Emissions- und Leistungswerte sind als Messprotokoll zu dokumentieren und der Bauherrschaft zu übergeben.

Sofern Störungen auftreten, die zum Abschalten der Anlage zwingen und welche länger andauern als im Werkvertrag vereinbart, beginnt der Probebetrieb nach der Störungsbehebung von vorne. Der Probebetrieb beginnt auch dann von vorne, wenn die Gesamtdauer aller Einzelstörungen einen im Werkvertrag vereinbarten Zeitraum übersteigt.

Zuständig und verantwortlich für die Inbetriebnahme der Holzkesselanlage und für den Probebetrieb ist der Anlagelieferant, da die Anlage noch nicht an die Bauherrschaft übergeben ist. Voraussetzung für die reibungslose Aufnahme des Heizbetriebes ist die Bestimmung des verantwortlichen Betriebspersonals, das entsprechend instruiert wird. Bei der Inbetriebnahme der Anlage hat das Betriebspersonal Gelegenheit, mit der Holzkesselanlage vertraut zu werden und es ist wichtig, dass sie vom Anlagelieferanten und von der Bauleitung unterstützt werden. Dazu gehört eine Vorinstruktion des Betriebspersonals durch den Anlagelieferanten. Die Vorinstruktion soll anhand des Betriebshandbuches erfolgen.

Umfang eines Betriebshandbuches

Betrieb der Holzkesselanlage:

- Kontrollen vor Inbetriebsetzung und Inbetriebnahme
- Schalterstellungen und Wirkungen
- Betriebsarten

Verhalten bei Störungen:

- Störungs- und Alarmierungskonzept
- Verhalten bei Störungen und Meldeliste
- Tabelle als Störmeldeprotokoll

Wartungsplan:

- Reinigungs- und Entaschungsintervalle
- Abgrenzung zu Revisionsarbeiten von Dritten

Sicherheitseinrichtungen:

- Sicherheitstechnische Ausrüstung
- Sicherheitsbestimmungen
- Vermeiden von Unfällen mit Gärgasen
- Vermeiden von Unfällen an Fördereinrichtungen

Dokumentationen:

- Anlageschema
- Elektropläne
- Vollständige Betriebsmittelliste im Klartext

Meist liegt das Betriebshandbuch während des Probebetriebes noch nicht in seiner endgültigen Version vor (Revisionsschema fehlt, Wartungsplan noch im Entwurfszustand etc.). Es genügt aber, anhand dieses Entwurfs zu instruieren. Die korrekte Handhabung der Schaltfunktionen, das Einhalten der Sicherheitsbestimmungen und das Verhalten bei Störungen stehen im Vordergrund der Informationsvermittlung. Während des Inbetriebsetzens der Anlage muss die Bauleitung sicherstellen, dass das Betriebspersonal vom Anlagelieferanten für den nachfolgenden Probebetrieb vollständig instruiert wird. Die erstmalige Einweisung des Betriebspersonals ist in einem Protokoll festzuhalten, welches von der Bauleitung, dem Anlagelieferanten und dem Betriebspersonal zu unterzeichnen ist.

15.5 Abnahme

Der Probebetrieb ist erfolgreich abgeschlossen und das Unternehmen möchte nun die Anlage an die Bauherrschaft übergeben. Diese Übergabe des Unternehmens beziehungsweise die Abnahme durch die Bauherrschaft ermöglichen es, die Übereinstimmung des Gewerks mit dem Pflichtenheft und den Fachregeln zu kontrollieren.

Eine Grundlage für die Übergabe ist die Leistungsfahrt, auch Abnahmeversuch genannt. Die Leistungsfahrt hat einen rechtsverbindlichen Leistungsnachweis der Anlage zum Ziel, welcher im Rahmen der Inbetriebnahme

während eines definierten Betriebszeitraumes zu erbringen ist. Das Programm hierfür wird vertraglich vereinbart [140].

Die Leistungsfahrt beginnt, wenn der Anlagelieferant die Anlage und die Regelung so weit in ihrer Fahrweise stabilisiert und optimiert hat, dass sie grundsätzlich für den störungsfreien Dauerbetrieb freigegeben werden kann. Zuständig und verantwortlich für die Leistungsfahrt der Holzkesselanlage ist der Anlagelieferant, da die Anlage noch nicht an die Bauherrschaft übergeben ist. Ist der Nachweis erfolgreich erbracht, schliessen sich häufig Abnahmeverhandlungen an, die mit der Unterzeichnung des Abnahmeprotokolls enden. Die Anlage ist dann im angestrebten kommerziellen Betrieb (Dauerbetrieb) [140].

Länderspezifische Regelungen

Bezüglich der Abnahme und ihrer Dokumentation sind die aktuellen länderspezifischen Gesetze, Normen und Regelwerke sowie die projektspezifischen vertraglichen Vereinbarungen zu beachten. Hierzu sei auch auf entsprechende Werkvertragsnormen verwiesen, in denen für spezifische Gewerke die Themen Abnahme und Übergabe geregelt werden. Es können sich Abweichungen von den im Folgenden genannten beispielhaften Anforderungen und Abläufen ergeben, unter anderem besondere Fristen.

Verantwortung, teilnehmende Personen, Ablauf

Kalt- und Heiss-Inbetriebnahme der Holzkesselanlage sind Sache des Anlagelieferanten und müssen bei der Abnahme abgeschlossen sein. Die gemeinsame Abnahme wird jedoch von der Bauüberwachung geleitet. An der Abnahme teilzunehmen haben

- die Bauüberwachung,
- der Anlagelieferant und
- die Bauherrschaft.

Bei der Abnahme erfolgt das Überprüfen des Liefer- und Leistungsumfangs des Anlagelieferanten anhand des Werkvertrages.

Zum Zeitpunkt der Abnahme hat der Anlagelieferant

- die vollständig nachgeführte Anlagedokumentation abzugeben, unter anderem mit Betriebsanleitung, revidierten Elektroschemata, revidierten Ausführungsplänen, Prüfprotokollen und Konformitätserklärung (siehe Q-Leitfaden, E.5) und
- das Betriebspersonal der Holzkesselanlage detailliert zu instruieren, wie die Anlage betrieben und gewartet werden muss.

Instruktion des Anlagenbetriebspersonals und schriftliche Betriebsunterlagen

Die Instruktion des Betriebspersonals ist bei Holzkesselanlagen besonders wichtig. Einen hohen Wirkungsgrad und niedrige Schadstoffemissionen können nur sorgfältig und fachgerecht betriebene und betreute Anlagen erreichen. Wird zum Beispiel ein anderer Brennstoff eingesetzt als beim Einregulieren, so muss das Betriebspersonal wissen, dass die Anlageeinstellung jetzt nicht mehr optimal ist und nachreguliert werden sollte.

Ein gutes Bedienungshandbuch, das auch Hinweise über das Verhalten bei Störungen und das Einstellen der Regelsollwerte enthält, ist für eine gute Anlagewartung unerlässlich.

Spätestens bei der Abnahme sollen die definitiven Betriebsunterlagen abgegeben werden. Während des Probebetriebes vorgenommene Änderungen an der Betriebseinstellung sollen dokumentiert und auf den neusten Stand nachgeführt sein. Oftmals werden Revisions- und Betriebsunterlagen erst nach der Abnahme nachgereicht. Es wird dabei vergessen, dass die Verantwortung mit der erfolgreichen Schlussabnahme an die Bauherrschaft übergeht. Das kann zu rechtlichen Problemen führen, wenn die Bauherrschaft nachweisen kann, dass sie ungenügend auf ihre Aufgabe vorbereitet worden ist, was beim Fehlen einer klaren Betriebsinstruktion der Fall ist.

Bei automatischen Holzkesselanlagen ist die Sicherheitskette umfangreicher als bei konventionellen Heizanlagen. Dem Vermeiden von Unfällen, zum Beispiel im Siloraum oder an Austragungseinrichtungen, ist im Bedienungshandbuch besondere Beachtung zu schenken.

Abnahmeprotokoll

Die gemeinsame Kontrolle und Abnahme gehen mit dem Ziel einher, ein von sämtlichen Parteien unterschriebenes Protokoll zu verfassen, das als Beweismittel für alle Beteiligten dient. Im Protokoll werden alle Positionen des Werkvertrages bezüglich der einzelnen Vertragserfüllung erfasst.

Nachfolgend sind nur diejenigen Punkte aufgeführt, die bei einer automatischen Holzheizung besonders zu beachten sind:

- Lieferumfangkontrollen (Typ, Leistungskontrolle, Abmessungen, Vollständigkeit)
- Ausführungskontrolle (Befestigungen, Dämmung, Werkstoffqualität, Masshaltigkeit)
- Sicherheitskontrollen (Sicherheitseinrichtungen, Rückbrandschutz, Unfallverhütung)
- Kontrolle der Steuerfunktionen (Liefergrenze)
- Emissions- und Leistungsnachweis
- Inbetriebnahme- und Probebetriebsprüfprotokoll

Die gemeinsame Kontrolle zeigt oft kleine Mängel und nicht ganz abgeschlossene Teilarbeiten auf. Sie kann zu drei verschiedenen Entscheidungen führen:

1. Die Installation kann abgenommen werden.
2. Die Installation kann mit Vorbehalten (geringe Mängel) abgenommen werden.
3. Die Installation kann nicht abgenommen werden (markante Mängel).

Die Abnahme kann bei der Feststellung von wesentlichen Mängeln verweigert werden. Die Bauherrschaft beziehungsweise die Bauüberwachung hat dem Anlagelieferanten eine annehmbare Frist für deren Behebung zu gewähren. Anschliessend wird eine zweite Abnahme eingeleitet. Positionen, die im ersten Protokoll als vertragskonform aufgeführt sind, werden in der zweiten Abnahme nicht mehr kontrolliert.

Die Unterscheidung zwischen kleinen und markanten Fehlern wird durch die Praxis bestimmt. Ein Fehler gilt grundsätzlich dann als markant, wenn es für die Bauherrschaft Gründe gibt, diesen so rasch wie möglich beheben zu lassen. Dazu gehören Fehler, die den einwandfreien Betrieb oder die Inbetriebnahme einer Anlage verhindern, die zu Schäden führen können oder die das Leben oder die Gesundheit von Personen, das Eigentum der Bauherrschaft oder von Drittpersonen gefährden. Ästhetische Fehler sind nicht markant. In jedem Fall ist zur Beurteilung eines Fehlers dessen Auswirkung auf die Gesamtinstallation zu berücksichtigen.

Können während der gemeinsamen Kontrolle einige Emissions- und Leistungsgarantiewerte nicht nachgewiesen werden, so sind diese als Leistungsvorbehalte genau definiert im Kontrollprotokoll festzuhalten.

Übergabe des Gewerks an die Bauherrschaft

Mit der erfolgreichen Abnahme wird das vom Anlagelieferanten erstellte Gewerk an die Bauherrschaft übergeben. Bei der Übergabe des Gewerkes an die Bauherrschaft hat diese die folgenden Pflichten zu übernehmen:

- Übergabe der Aufsicht: Ab dem Zeitpunkt der Übergabe ist es Sache der Bauherrschaft, sämtliche Massnahmen zu treffen, die das Leben und die Gesundheit von Personen, ihr Hab und Gut sowie das Eigentum von Drittpersonen schützen. Diese Pflichten hat bis zur Übergabe der Anlagelieferant zu erfüllen.
- Übergabe der Risiken: Der Anlagelieferant trägt kein Risiko mehr für Unfälle, die zu Beschädigungen oder zu Verlust des Gewerks führen.
- Garantie- und Verjährungsfristen beginnen.
- Der Anlagelieferant muss innerhalb eines bestimmten Zeitraumes die Schlussabrechnung abgeben.

Erst nach erfolgter mängelfreier Abnahme geht die Gefahr auf die Auftraggeberin oder den Auftraggeber über. Ab dem Zeitpunkt der Abnahme beginnt die Frist der Gewährleistung für die gesamte Leistung. Nur für in sich abgeschlossene Teile der Leistung beginnt der Gefahrenübergang mit der Teilabnahme.

Aufgaben des Planers oder der Planerin bei der Übergabe an die Bauherrschaft

Folgende Aufgaben sind bei der Übergabe der Gesamtanlage an die Bauherrschaft durch die Planerin oder den Planer zu erledigen:

- Die Anlagedokumentation gemäss Q-Leitfaden D.5 wird vollständig an die Bauherrschaft übergeben.
- Das Konzept für die Betriebsoptimierung gemäss Q-Leitfaden D.6 wird der Bauherrschaft vorgelegt.

Teil 4 – Betrieb und Bewirtschaftung

16 Betriebsoptimierung nach der Inbetriebnahme

16.1 Gründe und Zielsetzungen

Nach der erfolgreich abgeschlossenen Inbetriebnahme und Abnahme (siehe Kapitel 15) geht die errichtete Anlage, sowohl eine neu gebaute Anlage als auch eine Anlagenerweiterung, in den Regelbetrieb und in die Verantwortung der Eigentümerin oder des Eigentümers über. Die Erfahrungen aus vielen durchgeführten Anlagenuntersuchungen zeigen, dass bei komplexen Holzheizungsanlagen und Wärmenetzen zumeist noch kein optimaler Anlagenbetrieb erreicht werden kann, auch wenn Anlagen richtig projektiert und gebaut wurden und eine fachgerechte Inbetriebnahme mit Probebetrieb erfolgte.

Gründe dafür sind unter anderem:

- Die Planungsunsicherheit aufgrund der Schwankungsbreite bei der Wärmebedarfsermittlung
- Inbetriebnahme und Probebetrieb können nicht alle während eines gesamten Betriebsjahres auftretenden Lastzustände und Betriebsbedingungen abbilden
- Fehlende Betriebserfahrungen bezüglich des Verhaltens und der Regelungsdynamik der Anlage
- Wechselnde Brennstoffsortimente und Qualitätsschwankungen (z. B. Wassergehalt)

Zudem dauert es oft mehrere Jahre, bis der endgültige Ausbaugrad des Wärmenetzes erreicht wird, welcher der Planung und Dimensionierung der Wärmeerzeugung zugrunde lag. Unterscheidet sich der Ausbaugrad zum Zeitpunkt der Betriebsoptimierung signifikant vom Endausbau, sollte diese sinngemäss und so weit wie möglich entsprechend der hier dargestellten Vorgangsweise erfolgen. Aufgrund der dynamischen Entwicklung eines Wärmenetzes über viele Jahre ist es umso wichtiger, ein laufendes betriebsbegleitendes Anlagenmonitoring und eine kontinuierliche Betriebsoptimierung zu etablieren und das detaillierte Anlagenmonitoring dem Ausbaustand folgend periodisch zu wiederholen.

Sollten ganzjährig relativ konstante Betriebsbedingungen in Hinsicht auf Lastverlauf, Brennstoffqualität und anderem vorliegen, kann die Betriebsoptimierung verkürzt und schon während der Inbetriebnahme und des Probebetriebes erfolgen. Es sollte jedoch sichergestellt werden, dass die nachfolgenden Anforderungen der Betriebsoptimierung grösstenteils abgedeckt werden können. Dies könnte beispielsweise bei einem Holzheizwerk für eine reine Prozesswärmeversorgung und einem untergeordneten klimaabhängigen Lastanteil der Fall sein.

Im Zuge der Inbetriebnahme und des Probebetriebes erfolgt eine grundlegende Anlagen- und Regelungseinstellung, die einen stabilen und automatischen Betrieb ermöglicht. Insbesondere die Regelung ist jedoch auf Basis erster Betriebserfahrungen weiterführend zu optimieren. Die Zielsetzung dieser (ersten) Betriebsoptimierung ist es, einen planungskonformen Betrieb entsprechend der Funktionsbeschreibung mit höchster Effizienz, geringen Emissionen sowie stabilen Betriebsparametern wie beispielsweise den Vorlauftemperaturen zu erreichen. Dazu gehört auch eine möglichst schonende Betriebsweise, um möglichst hohe Standzeiten (bzw. Reisezeiten zwischen zwei Reinigungsintervallen) zu erreichen und Störungen beispielsweise durch Schlackenbildung, Über- oder Unterschreitung zulässiger Betriebsgrenzen und anderem zu vermeiden. Die umfassende betriebliche Optimierung führt zu niedrigen Betriebskosten, einer geringen Umweltbelastung und einer langen Anlagenlebensdauer.

Die Betriebsoptimierung erfordert eine systematische Beurteilung und Überprüfung des aktuellen Anlagenbetriebes auf Basis vollständiger und belastbarer Messdaten sowie einen Vergleich der Betriebsdaten und Kennzahlen mit den Vorgaben der Funktionsbeschreibung, um folgende Fragen zu beantworten:

- Funktioniert die Anlage in allen Betriebszuständen wie vorgesehen?
- Müssen die Regelungsparameter noch angepasst werden?
- Wo gibt es noch Mängel oder offene Fragen?
- Wann und wie können vorhandene Mängel behoben werden?
- Werden Garantiewerte, die erst im Langzeitbetrieb beurteilt werden können, eingehalten (Stromverbrauch, Reisezeit usw.)?

Betriebsoptimierung mit QM Holzheizwerke

Neben einer fachgerechten und gewissenhaften Planung ist auch die laufende Betriebsoptimierung ein wichtiger Grundstein für einen langfristig erfolgreichen Anlagenbetrieb. Da dies in der Vergangenheit oft vernachlässigt wurde, wird im Rahmen von QM Holzheizwerke zwingend eine Betriebsoptimierung gefordert (siehe Kapitel 2).

Die in Kapitel 16.2 bis 16.4 erläuterten Voraussetzungen, Verantwortlichkeiten und Abläufe entsprechen im Wesentlichen den Vorgaben gemäss Q-Leitfaden [15]. QM Holzheizwerke bietet dazu folgende Dokumente und Hilfsmittel:

- Funktionsbeschreibungen für Standardschaltungen [62] und [71]
- Messstellenlisten
- Beschreibung der Datenaufzeichnung
- Vordefinierte Kennzahlen
- Betriebsoptimierungskonzept – siehe Zusatzdokument 424 im Q-Leitfaden [15]
- FAQ 8: Wie sollen die Beurteilung und die Darstellung der Daten in der Betriebsoptimierung erfolgen?

Die hier dargestellte Betriebsoptimierung ist als Mindestanforderung zu betrachten und kann je nach Bedarf auch deutlich detaillierter durchgeführt und/oder auf weitere Anlagenkomponenten ausgedehnt werden.

Im Sinne einer sorgfältigen Betriebsführung sollten Datenerfassung, Monitoring und davon abgeleitete Optimierungsmassnahmen laufend weitergeführt und dokumentiert werden. Damit entsteht eine Daten- und Wissensgrundlage, die für eine spätere Anlagenerweiterung, Erneuerung und Modernisierung von grossem Wert ist (siehe Kapitel 18).

16.2 Voraussetzungen und Verantwortlichkeiten

Die grundlegende Betriebsoptimierung wird je nach Anlagengrösse in den ersten ein bis zwei Jahren nach der Abnahme der Anlage durchgeführt. Bei Fernwärmeanlagen sollte zumindest ein volles Betriebsjahr beziehungsweise eine volle Heizperiode für diese Betriebsoptimierung herangezogen werden.

Im Zuge der Planung muss eine umfassende Funktionsbeschreibung erstellt werden. Diese ist unter anderem Basis für die Detailplanung und Ausführung, insbesondere die hydraulische Verschaltung und Regelung, aber auch grundlegend notwendige Voraussetzung für eine erfolgreiche Betriebsoptimierung. In Summe werden folgende Unterlagen für die Betriebsoptimierung vorausgesetzt:

- Vollständiges und letztgültiges Hydraulikschema
- Detaillierte Beschreibung der Funktionsweise der Anlage für alle relevanten Betriebszustände inklusive Regelungsbeschreibung
- Vollständige Messstellenliste, die je Messstelle die Messposition, den Messbereich, die zeitliche Auflösung und die Messgenauigkeit enthält
- Beschreibung der automatischen Datenaufzeichnung mit Dokumentation des Grundprinzips, der Daten- bzw. Dateistruktur sowie Ort und Dauer der Datenspeicherung
- Liste der vereinbarten und garantierten Kennzahlen, mit denen der Nachweis für einen optimalen Betrieb erbracht werden soll
- Dokumentation und Datenblätter der wesentlichen Anlagenkomponenten

Zusätzlich sind klare Verantwortlichkeiten für die Vorbereitung und Durchführung der Optimierungsarbeiten zu definieren und unbedingt in die Beauftragung der Hauptplanerin oder des Hauptplaners sowie gegebenenfalls anderer verantwortlicher Beauftragter (z. B. Herstell- oder Regelungstechnikunternehmen) aufzunehmen. Die Zuteilung der Hauptverantwortung für die erforderlichen Tätigkeiten wird wie folgt empfohlen, kann aber je nach Situation auch anders gewählt werden:

- Planung und Spezifikation der Datenaufzeichnung durch die Planerin oder den Planer
- Überwachung der automatischen Datenaufzeichnung durch das Betriebspersonal
- Durchführung ergänzender manueller Aufzeichnungen durch das Betriebspersonal
- Auslesen und Bereitstellen der Messdaten durch das Betriebspersonal der Anlage sowie Regelungstechnikunternehmen oder Hersteller
- Auswertung, Kennzahlenberechnung und Beurteilung der Daten durch die Planerin oder den Planer

Die Tätigkeiten im Rahmen der Optimierung sollten in enger Abstimmung mit dem Anlagenbetriebspersonal und den Herstellern erfolgen.

Die Verantwortlichkeiten und Anforderungen bezüglich Datenerfassung und Durchführung der Betriebsoptimierung sollten in einem Betriebsoptimierungskonzept zusammengefasst werden (siehe Zusatzdokument 424 im Q-Leitfaden [15]).

Damit eine erfolgreiche Betriebsoptimierung gemeinsam mit den Herstellern erfolgen kann, sind entsprechende finanzielle Sicherstellungen (Haftrücklässe) für die Gewährleistungsdauer in den Werkverträgen vorzusehen. Andernfalls kann nicht gewährleistet werden, dass alle Hersteller gezielt an der Betriebsoptimierung mitwirken.

16.3 Datenaufbereitung und Beurteilung

Eine umfassende messtechnische Ausstattung von Heizwerk und Wärmenetz und eine geeignete Leittechnik für die Übertragung, Speicherung und Visualisierung der gemessenen Betriebsdaten sind ein wichtiges Hilfsmittel für die laufende Betriebsführung und wesentliche Grundlage zur Durchführung einer Betriebsoptimierung.

Im Zuge des Monitorings erfolgt die Aufbereitung und Auswertung der Betriebsdaten. Dazu werden entsprechend Tabelle 16.1 die wesentlichen **Jahreswerte** für das zu betrachtende Betriebsjahr und davon abgeleitete Kennzahlen ermittelt. Damit erhält man rasch einen Überblick über den Anlagenbetrieb und kann die ermittelten Kennzahlen mit den Planungswerten vergleichen.

Zusätzlich sind detaillierte **Betriebsdaten** in hoher zeitlicher Auflösung (z. B. 5-min-Werte) erforderlich, die mit Hilfe einer entsprechenden messtechnischen Anlagenausstattung und Datenerfassung bereitgestellt werden müssen (Kapitel 5.10). Diese sind für ausgewählte **Betriebszustände** und Zeiträume auszuwerten. Dazu werden in Anlehnung an QM Holzheizwerke die folgenden Betriebszustände definiert:

- **Schwachlast** nahe der Heizgrenze in der Übergangszeit oder im Sommer
- **Hauptlast** als der Lastbereich, in dem der Grossteil der Wärmeproduktion erfolgt. Die Aussentemperatur liegt beispielsweise im Tagesmittel im Bereich 0 – 10 °C. Bei Mehrkesselanlagen zählt der Kaskadenbetrieb zur Hauptlast, aber auch zur Hochlast.
- **Hochlast** bei sehr kalter Witterung, wenn beispielsweise die Aussentemperatur im Tagesmittel unter 0 °C liegt. Kaskadenbetrieb bei Mehrkesselanlagen sowie Spitzenlastbetrieb mit Bivalentkessel zählen auch zur Hochlast.
- **Ausserordentliche Last- und Betriebszustände**

Die Auswahl der Betriebszustände ist in Abhängigkeit der Anlagenkonfiguration oder der Standardschaltung ([62] oder [71]) und anderer Einflussfaktoren, beispielsweise wenn es keinen Sommerbetrieb gibt, entsprechend anzupassen.

Damit diese Detaildaten gut interpretiert und beurteilt werden können, ist eine grafische Darstellung der Daten unerlässlich und muss folgende Anforderungen erfüllen:

- Darstellung eines repräsentativen Wochenverlaufes für jeden der definierten Betriebszustände
- Darstellung des Tagesverlaufes ausgewählter Tage
- Die wichtigsten Daten müssen in einem einzigen Diagramm gemeinsam dargestellt werden können.
- Die Diagramme müssen gut lesbar sein sowie Achsenbeschriftungen und Legenden aufweisen, damit numerische Werte leicht herauslesbar sind.
- Erstellung und Übermittlung zum Beispiel als Excel-Datei unterstützen die Analyse und Interpretation der Daten.

Die Detailanforderungen bezüglich der auszuwertenden Messstellen und Beurteilungskriterien sind in Tabelle 16.2 und Tabelle 16.3 zusammengefasst. Diese enthalten auch Empfehlungen, wie die einzelnen Parameter zu sinnvollen Tages- und Wochenverlaufsdiagrammen gruppiert werden können. Die Darstellung der Diagramme kann bei Bedarf an die jeweils zu beurteilenden Fragestellungen angepasst werden.

Manche Leitsysteme beziehungsweise Anlagenvisualisierungen bieten umfassende Möglichkeiten zur nutzerspezifischen Erstellung und zum Export von Zeitverlaufsdiagrammen, die dann direkt für die Beurteilung und zur Betriebsoptimierung verwendet werden können.

Weitere Details und Beispiele sind in FAQ 8 von QM Holzheizwerke enthalten.

Tabelle 16.1 Erforderliche Jahreswerte und davon abgeleitete Kennzahlen.

	Parameter	Einheit	Beurteilung
Für alle Holzkessel (HK)	Jahreswärmeproduktion	MWh/a	Vollbetriebsstundenzahl HK
	Nennleistung	kW	Richtwert Standardschaltung
	Betriebsstunden gesamt	h/a	Anzahl Starts pro Jahr
	30 - 50 %		
	50 - 75 %		
	75 - 100 %		
	Stand-by	h/a	
	Zünden/Anfahren	h/a / n	
	Strombedarf Holzkessel	kWh/a	spezifischer Strombedarf Holzkessel
Abgaskondensation (AK)	Jahreswärmeproduktion	MWh/a	Vollbetriebsstundenzahl AK
	Nennleistung	kW	Anteil Kondensation an Jahreswärmeproduktion der Holzkessel
	Betriebsstunden gesamt	h/a	
	Strombedarf Abgaskondensation	MWh/a	spezifischer Strombedarf AK
	Wasserverbrauch	l/a	Spezifischer Wasserverbrauch AK
Staubabscheideeinrichtung (Elektroabscheider/Gewebefilter)	Betriebsstunden gesamt	h/a	Verfügbarkeit
	Betriebsstunden Filter aktiv	h/a	
	Betriebsstunden Bypass	h/a	
	Verfügbarkeit gemäss FAQ 38	%	
	Betriebsstunden Feuerung EIN	h/a	
	Zugehörige Betriebsstunden Abscheider EIN	h/a	
	Jahreswärmeproduktion	MWh/a	Vollbetriebsstundenzahl BK

	Parameter	Einheit	Beurteilung
Für alle Bivalentkessel (BK) und andere Wärmequellen	Nennleistung	kW	Anteil an Jahresproduktion
	Betriebsstunden gesamt	h/a	
	Strombedarf Bivalentkessel/Sonstige	MWh/a	spezifischer Strombedarf BK
Wärmenetz	Jahreswärmebedarf ab Zentrale	MWh/a	Netzverluste
	Jahreswärmebedarf der Abnehmer	MWh/a	ΔT im Jahresmittel
	Wassermenge	m³/a	Verluste Speicher/Zentrale
	Strombedarf Netzpumpen	MWh/a	spezifischer Strombedarf Netzpumpen
Brennstoffeinsatz und Hilfsenergie	Holzhackschnitzel, Rinde, Späne usw.	kg/a (m³/a)	Anlagennutzungsgrad
	Pellet	m³/a	Jahresnutzungsgrad Pelletkessel
	Öl oder Gas		Jahresnutzungsgrad Bivalentkessel
	Strombedarf Wärmepumpenanlage		Jahresarbeitszahl Wärmepumpe
	Strombedarf Gesamtanlage		spezifischer Strombedarf Gesamtanlage

Tabelle 16.2 Diagramme, Messstellen und Beurteilungskriterien – Wochenverlauf.

Diagramm	Parameter	Einheit	Beurteilung
Wochenverlauf	Leistung Holzkessel 1 Ist	kW	Relevanz Auswahl Tagesverlauf
	Leistung Holzkessel 2 Ist	kW	Anzahl Starts pro Tag/Woche
	Leistung Bivalentkessel Ist	kW	Zu-/Wegschalten Bivalentkessel
	Leistung Netz Ist	kW	Zusammenspiel mit anderen Wärmequellen
	Speicherladezustand Ist	%	
	Aussentemperatur	°C	

Tabelle 16.3 Diagramme, Messstellen und Beurteilungskriterien – Tagesverlauf.

Diagramm	Parameter	Einheit	Beurteilung
Übersicht	Aussentemperatur	°C	Betriebszustand
	Speicherladezustand Ist	%	Regelung Speicherladezustand
	Speicherladezustand Soll	%	Zu-/Wegschalten Bivalentkessel
	Leistung Holzkessel 1 Ist	kW	Zusammenspiel mit anderen Wärmequellen
	Leistung Holzkessel 2 Ist	kW	
	Leistung Bivalentkessel Ist	kW	
	Leistung weiterer Wärmequellen	kW	
Für jeden Holzkessel	Kesselaustrittstemperatur	°C	ΔT bei Nennleistung Nennleistung
	Kesseleintrittstemperatur	°C	
	Leistung Holzkessel 1 Ist	kW	Minimalleistung
	Leistung Holzkessel 1 Soll	kW, %	Leistung folgt Bedarf ohne Schwingen; Leistung auf tiefstmöglichem Niveau
	Restsauerstoffgehalt / Lambda	% / –	Feuerungswirkungsgrad
	Abgastemperatur	°C	Regelung Kesselaustrittstemperatur
			Anzahl Starts pro Tag
			Einhaltung Schwachlastbedingung
			Minimale Tageswärmeproduktion
			Sommerbetrieb und Wechsel der Holzkessel im Herbst/Frühling
Für alle anderen Wärmequellen (ausser Bivalentkessel)	Leistung Ist		
	Leistung Soll		
	Eintrittstemperatur		
	Austrittstemperatur		
	Sonstige spezifische Parameter (je nach Art der Wärmequelle)		spezifische Kennzahlen je nach Art der Wärmequelle
			Anzahl Starts pro Tag
Zusatzdiagramm	Vorlauftemperatur Netz Ist	°C	Temperaturdifferenz des Wärmenetzes
	Rücklauftemperatur Netz Ist	°C	
	Leistung Netz Ist	kW	Bivalentkessel nur bei Bedarf in Betrieb, Lastspitzen Wärmenetz

Diagramm	Parameter	Einheit	Beurteilung
	Freigabesignal bivalente oder andere Wärmeerzeuger	kW, %	Holzkesselleistung bleibt maximal beim Betrieb des Bivalentkessels
	Haupt-Vorlauf vor/nach Speicher	°C	Geplante Einsatzreihenfolge anderer Wärmequellen
	Haupt-Rücklauf vor/nach Speicher	°C	Nennleistung
			Minimalleistung
			ΔT bei Nennleistung
			Regelung Kesselaustrittstemperatur
			Leistung folgt Bedarf ohne Schwingen
			Leistung auf tiefstmöglichem Niveau
			Regelung Kesselaustrittstemperatur
Speicher	Temperatur Speicher-Fühler	°C	Temperaturschichtung Ladung/Entladung
	Speicherladezustand Ist	%	Nutzbare Temperaturdifferenz im SpeicherT
Erforderliche Zusatzparameter: - Tagesmittelwert [°C] für den jeweils ausgewählten Tag - Tageswärmeproduktion [kWh/d] für jeden Wärmeerzeuger - Minimallastbedingung [kW oder % der Nennlast] für jeden Holzkessel bzw. auch andere Wärmeerzeuger			

16.4 Durchführung

Sind alle Betriebsdaten aufbereitet, kann darauf aufbauend die eigentliche Analyse und Beurteilung erfolgen und der reale Anlagenbetrieb mit der gemäss Planung definierten Funktionsweise der Anlage (Soll-Betrieb) verglichen werden. Dies ist Aufgabe der Hauptplanerin oder des Hauptplaners. Diese müssen im Zuge dieser Schlussprüfung dokumentieren, ob die Anlage wie vorgesehen funktioniert. Als Grundlage dafür sind alle zuvor genannten Dokumente, Betriebsdaten, Kennzahlen und Diagramme sowie die Beurteilungskriterien aus Tabelle 16.1 bis Tabelle 16.3 heranzuziehen. Zudem wird empfohlen, alle zusätzlich verfügbaren Informationen wie beispielsweise wiederkehrende Emissionsmessungen, Betriebsbuch/Störfallprotokolle, Betriebserfahrungen des Betriebspersonals und einen Anlagenrundgang in die Beurteilung miteinzubeziehen.

Bei der Durchführung der Betriebsoptimierung müssen unter anderem folgende Fragen beantwortet werden:

- Sind die vorhandenen Messdaten vollständig und plausibel oder könnten Messfehler vorliegen?
- Vergleich der Plan- und der Ist-Werte des Wärmebedarfs der Gesamtanlage und von einzelnen Wärmekunden im Zuge einer Abnehmeranalyse (Basis ist die Excel-Tabelle Situationserfassung). Bei grösseren Abweichungen soll eine Detailanalyse zeigen, ob ein systematischer Fehler oder andere Gründe vorliegen.
- Entspricht die Anlageneffizienz (Jahresnutzungsgrad Erzeugung und Netz) den geplanten Zielwerten?
- Erbringt der Holzkessel die vertraglich vereinbarte Nennleistung (konstant und ohne Schwingen)?
- Arbeitet der Holzkessel bei der vertraglich vereinbarten Minimalleistung ohne Unterbrechung der Verbrennungsluftzufuhr?
- Arbeitet die Leistungsregelung im Teillastbetrieb so, dass der/die Holzkessel immer auf dem tiefst möglichen Niveau betrieben wird/werden, sodass der/die Holzkessel langsam und ohne Schwingen dem Verlauf des Leistungsbedarfs zu folgen vermögen?
- Werden Öl- oder Gaskessel, falls vorhanden, nur dann freigegeben, wenn dies unbedingt erforderlich ist? Werden diese wieder gesperrt, sobald die erforderliche Leistung vom Holzkessel abgedeckt werden kann? Stimmen die Umschaltpunkte (Bivalenzpunkte) mit der Annahme aus der Planung (Excel-Tabelle Situationserfassung) überein?
- Ist der Sommerbetrieb mit dem (kleinen) Holzkessel möglich und wann soll im Herbst/Frühling das Umschalten vom kleinen auf den grossen Holzkessel beziehungsweise umgekehrt erfolgen?
- Funktioniert die Speicherladeregelung gemäss den Vorgaben in der Funktionsbeschreibung und führt sie zu einem gleichmässigen Betrieb der Holzkessel?
- Bleibt die Temperaturschichtung im Speicher beim Laden und Entladen erhalten und wird die vorgesehene nutzbare Temperaturdifferenz erreicht?
- Werden häufige An- und Abfahrvorgänge weitgehend vermieden?
- Treten Betriebszustände auf, die zu Geruchsbelästigungen und hohen Emissionen führen?
- Wird die Anlage mit den spezifizierten Restsauerstoffwerten und Abgastemperaturen betrieben?
- Können alle spezifizierten Brennstoffe problemlos eingesetzt werden?
- Ist der Ausbrand der Aschen vollständig und treten keine Probleme mit Verschlackungen auf?
- Entsprechen die gemessenen Temperaturen den Planungswerten und ist das Zeitverhalten stabil?
- Folgt die Hauptvorlauftemperatur des Wärmenetzes der geplanten Regelstrategie (z. B. aussentemperaturabhängig)?
- Entspricht die Hauptrücklauftemperatur den erwarteten Werten und wo gibt es Optimierungspotenziale (hierzu kann eine Abnehmeranalyse entsprechend dem Planungshandbuch Fernwärme [19] durchgeführt werden)?

- Entspricht die Verfügbarkeit des Elektroabscheiders, falls vorhanden, den Spezifikationen beziehungsweise Garantiewerten (siehe FAQ 38)?
- Entspricht der spezifische Stromverbrauch den Planwerten oder den Herstellerangaben?
- Wird die garantierte Reisezeit zwischen den manuellen Kesselreinigungen erreicht?
- Sind die Serviceintervalle nicht kürzer als garantiert?
- Häufen sich Störfälle bei einzelnen Komponenten?
- Tritt bei Anlagenteilen erhöhter Verschleiss auf (z. B. Schamotte in der Feuerung, Elemente des Rostes)?

Ergibt diese Beurteilung Mängel in Funktionsweise und Betrieb der Anlagen, sind entsprechende Optimierungsmassnahmen zu definieren. Diese betreffen in der Regel die schrittweise Anpassung der Regelungsparameter bei gleichzeitiger Beobachtung der Auswirkungen.

Bei der Anpassung von Regelungsparametern gilt es zu beachten, dass immer nur ein Parameter angepasst wird und genug Zeit eingeplant wird, um die Auswirkungen zu beobachten. Das System Holzfeuerung reagiert je nach Parameteranpassung sehr träge und es sollten für diesen Vorgang Stunden oder Tage eingerechnet werden. Alle Anpassungen sind in einem Betriebsjournal detailliert zu dokumentieren. Die Dokumentation hat so zu erfolgen, dass alle am Projekt beteiligten Personen später die Änderungen einsehen und nachvollziehen können.

Bei Bedarf sind Regelungsexpertinnen oder -experten und Hersteller hinzuzuziehen. Grobe Mängel sollten im Zuge der Gewährleistung umgehend schriftlich an die Hersteller kommuniziert werden. Sollten im Zuge der Betriebsoptimierung sicherheitsrelevante Mängel jedweder Art erkannt werden, haben fachkundige Personen (u. a. Planerinnen und Planer) eine Hinweispflicht gegenüber den Verantwortlichen der Anlagen und sollten entsprechende Mängel umgehend schriftlich übermitteln.

Das verantwortliche Betriebspersonal sollte bestmöglich in die Beurteilung und Optimierung eingebunden werden. Ziel der Betriebsoptimierung ist auch, ein betriebsbegleitendes Anlagenmonitoring und eine kontinuierliche Betriebsoptimierung zu etablieren.

17 Betrieb und Instandhaltung

17.1 Betriebsorganisation

Ein Holzheizwerk mit Wärmeverbund ist ein Unternehmen wie jedes andere. Es gelten dementsprechend die gleichen Ansprüche bezüglich einer professionellen administrativen und kaufmännischen Unternehmensführung.

Die Geschäftsleitung ist im administrativen und kaufmännischen Bereich für die folgenden Aufgaben zuständig:

- Bekanntgabe der wichtigsten Vorschriften, Richtlinien und Gesetze an das Betriebspersonal
- Information des Betriebspersonals über die für sie wichtigen Bestimmungen in den Wärmelieferverträgen und im Brennstofflieferver trag
- Abschluss von rechtskonformen Verträgen (Brennstofflieferver trag, Wärmelieferverträge usw.)
- Erfassung und Umsetzung von Optimierungspotenzialen in den folgenden Bereichen:
  - gut organisierter Brennstoff- und Stromeinkauf (Strompooling)
  - Versicherungen
  - Personaleinsatz/Personalleasing
  - Brennstofflogistik mit geringem Aufwand, Reduktion von Brennstoffmanipulation und Fahrzeugeinsatz (Betriebsmittel wie Radlader eventuell mieten oder in Synergie z. B. mit der Gemeinde nutzen).
- Kooperation mit Betreiberverbänden und/oder anderen Heizwerken (z. B. Einkaufsgemeinschaften, gemeinsame Ersatzteilhaltung)
- Professioneller Kundenservice (Kommunikation mit den Kundinnen und Kunden, Information, Service, Hotline usw.)

In Bezug auf den erfolgreichen technischen Betrieb sind folgende Hinweise zur Betriebsorganisation zu beachten.

Der geordnete Betrieb erfordert eine Betriebsorganisation mit einer Liste der beteiligten Personen und deren Verantwortlichkeiten sowie Befugnissen. Eine vollständige, aktuelle Anlagedokumentation gemäss Q-Leitfaden QM Holzheizwerke «E.5 Q-Forderungen Anlagedokumentation» [15] bildet die Basis, dass das Betriebspersonal das Holzheizwerk mit Wärmenetz jederzeit mit den aktuellen Anlagendaten betreiben und instand halten kann.

Alle zutreffenden Gesetze und Richtlinien sowie insbesondere die Auflagen entsprechend der Betriebsanlagengenehmigung sind in den laufenden Anlagenbetrieb einzubeziehen. Das betrifft unter anderem folgende Bereiche:

- Brandschutz
- Arbeitssicherheit/Schutzausrüstung
- Explosionsschutz
- Wiederkehrende Überprüfungen

Notfallpläne für folgende Szenarien sind zu erarbeiten:

- Noteinspeisung/Sicherstellung der Wärmeversorgung bei Totalausfall der Erzeugung
- Woher bekomme ich eine mobile Notheizung und wie lange dauert das?
- Vorgehen bei Stromausfall und Prüfung der Notwendigkeit einer Notstromversorgung.
- Vorgehen bei eingeschränkter Zugänglichkeit zum Heizwerk (z. B. Winter, Gebirgsregion) bezüglich Brennstoffversorgung, Betriebsmittel und Personal.
- Welche essentiellen Ersatzteile müssen vor Ort vorhanden sein, um längere Betriebsunterbrechungen zu vermeiden?

17.2 Technischer Betrieb

Die wichtigsten Voraussetzungen für einen einwandfreien Betrieb eines Holzheizwerks sind:

- Die Verwendung von Energieholzsortimenten, die für die Holzkesselanlage geeignet sind und für die sie einreguliert wurde. Die Brennstoffqualität hat der Brennstoffdefinition gemäss Werkvertrag mit dem Anlagelieferanten zu entsprechen.
- Regelmässige Überwachung der Betriebsdaten wie Abgastemperatur, Luftüberschuss, Drehzahl Abgasventilator, Betriebszeiten usw.
- Regelmässiger Kontrollgang in der Anlage, damit zum Beispiel undichte Hydraulikschläuche frühzeitig entdeckt werden oder Brennstoffteile mit Übergrösse aus dem Brennstoff entfernt werden können
- Regelmässige Anlagewartung gemäss Anweisung der Hersteller
- Detailliertes Pflichtenheft für das Betriebspersonal mit Arbeitsbeschreibung, Verantwortlichkeiten und Berechtigung für die einzelnen Aufgabenbereiche

Das **Vorgehen bei Störungen** ist im Betriebshandbuch der Hersteller beschrieben. Das Betriebspersonal muss speziell auf grössere Störfälle (Stromausfall, Ausfall eines Holzkessels, Unterbrechung der Brennstoffversorgung, …) vorbereitet sein, um im Ernstfall schnell reagieren zu können. Mit dem Verständnis für Störungen und Kenntnissen über deren Behebung kann ein Teil der Schwierigkeiten im Voraus ausgeschlossen werden.

17.3 Instandhaltung

17.3.1 Allgemeines

Die Instandhaltung umfasst Wartung, Inspektion (Überwachung), Instandsetzung (Unterhalt) und Verbesserung der Anlagentechnik.

Die Ziele der Instandhaltung sind ein störungsfreier Betrieb, eine optimale und umweltschonende Betriebsweise, ein hoher Jahresnutzungsgrad sowie die Werterhaltung der Anlagen und Komponenten bei geringem Aufwand und tiefen Kosten.

Das Führen eines Betriebsjournals ermöglicht es, jederzeit den zeitlichen Verlauf der wichtigsten Instandhaltungsschritte nachzuvollziehen. Dies ist die Basis für die Koordination und Planung der erforderlichen Instandhaltungsmassnahmen.

Eine zustandsbezogene und vorausschauende Wartung umfasst unter anderem auch Wandstärken- und Verschleissmessungen an kritischen Stellen (z. B. Kesselrohre, Schamottierung, Rost/Rostelemente, Förderaggregate, Pumpen, Ventilatoren) sowie die Kontrolle von Leckwarn- und Sicherheitseinrichtungen, die Druckhaltung (Nachspeisemengen) und die regelmässige Überprüfung der Wärmeträgerqualität. Dadurch können die Lebensdauer der Anlage erhöht und die Instandsetzungs- und Wartungskosten auf lange Sicht reduziert werden.

Die Wirtschaftlichkeit des Betriebs eines Holzheizwerks mit Wärmenetz wird durch die Kosten für die Instandhaltung stark beeinflusst und muss bereits in der Planung berücksichtigt werden (siehe auch Kapitel 3).

Der Anteil der Instandhaltung wird vielfach auf die Investitionskosten bezogen. In Bild 17.1 betragen die Instandhaltungskosten 4 % der Investitionskosten der Wärmeerzeugung. Weitere Hinweise dazu sind in Kapitel 10.3 zu finden.

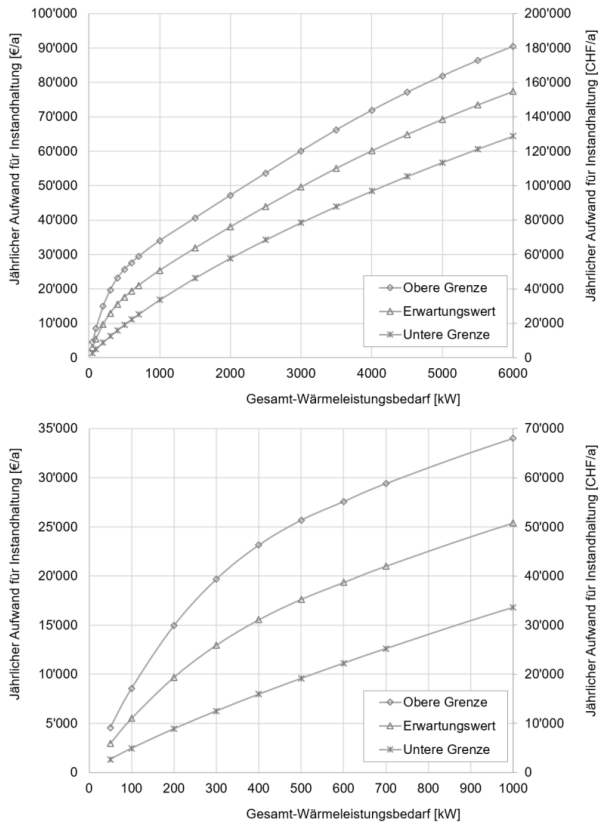


Bild 17.1 Jährlicher Aufwand für Instandhaltung in Abhängigkeit des Gesamt-Wärmeleistungsbedarfs der Anlage (Erfahrungswert = 4 % der Investkosten gemäss Bild 10.8).
Oben: Bereich bis 6'000 kW
Unten: Bereich bis 1'000 kW.

17.3.2 Wartung und Inspektion

Wartung und Inspektion umfassen Betriebsüberwachung inklusive Kontrolle der Verfügbarkeit des Partikelabscheiders, Behebung von Störungen, Wartungsarbeiten wie Reinigung oder Schmieren, regelmässige Funktionskontrolle der Anlagenteile sowie periodische Wartung durch die Hersteller der einzelnen Anlagenkomponenten. Zu diesem Zweck dienen der Wartungsvertrag für die Holzkesselanlage oder den Partikelabscheider sowie die periodische Reinigung des Kessels und der Kaminanlage durch Kaminfeger (Schornsteinfeger). Neben der laufenden Inspektion müssen auch alle allenfalls gesetzlich vorgeschriebenen wiederkehrenden Überprüfungen durchgeführt und dokumentiert werden (z. B. Rückbrandsicherungen, Hebezeuge, automatische Tore, Fahrzeuge, Brandschutz- und Löscheinrichtungen, Notfallbeleuchtung etc.). Soweit dies nicht in Form von Eigenüberprüfungen zulässig ist, müssen entsprechend zertifizierte Stellen damit beauftragt werden.

Der Anteil für Wartung und Inspektion beträgt als Richtwert 2 % der Investitionskosten der Wärmeerzeugung und macht somit die Hälfte der gesamten Instandhaltungskosten entsprechend Bild 17.1 aus. Weitere Hinweise dazu sind in Kapitel 10.3 zu finden.

Wartungsarmer Betrieb
Damit eine Holzkesselanlage neben einem störungsfreien Betrieb wartungsarm betrieben werden kann, ist der Aufwand für die Kesselreinigung auf ein Minimum zu reduzieren.

Dafür erforderlich sind eine automatische Kesselrohrabreinigung und eine automatische Austragung der Asche aus dem Feuerraum.

Kesselreinigung
Die beim Verbrennungsvorgang zurückbleibende Asche und Fremdmaterial lagern sich an folgenden Stellen ab, die vom Betriebspersonal oder vom Kaminfeger periodisch gereinigt werden müssen:

- Wärmeübertragerzüge des Kessels oder des nachgeschalteten Wärmeübertragers (Flugasche) und deren Umlenkkammern
- Ausbrandzone
- Feuerraum (Rostasche), bei Unterschubfeuerungen um die Ausbrandretorte herum, bei den Rostfeuerungen am Rostende
- Unter dem Rost (Rostasche) oder unter der Ausbrandretorte

In den Betriebsunterlagen des Kessellieferanten ist die Kesselreinigung beschrieben und es ist festgelegt, wie oft eine Reinigung nötig ist. Das Reinigungsintervall ist abhängig vom Brennstoff, vom Abbrandverhalten des Brennstoffes auf dem Rost (stabiles Brennstoffbett ohne Durchbrüche respektive ohne Hotspots), von der Betriebsweise der Anlage und vom Betriebszustand der Anlage.

Ein guter Indikator für den Verschmutzungszustand der Anlage ist die Abgastemperatur, die deshalb regelmäs-

sig überprüft werden sollte. Verschmutzte Wärmeübertragerflächen verschlechtern die Wärmeübertragung an das Heizungswasser. Die Folge davon sind eine erhöhte Abgastemperatur und somit höhere Abgasverluste. Bezogen auf den gereinigten Kesselzustand und bei gleicher Feuerungsleistung ist eine Kesselreinigung beim Anstieg der Abgastemperatur um 20 K – 30 K erforderlich. In der Regel beträgt das Intervall zwei bis drei Wochen.

Durch eine automatische pneumatische oder mechanische Kesselrohrreinigung kann die Reisezeit zwischen zwei manuellen Kesselreinigungen auf eine Vollbetriebsstundenzahl von 2'500 – 3'000 h/a respektive auf ein halbjährliches Intervall erhöht werden (siehe auch Kapitel 5.5).

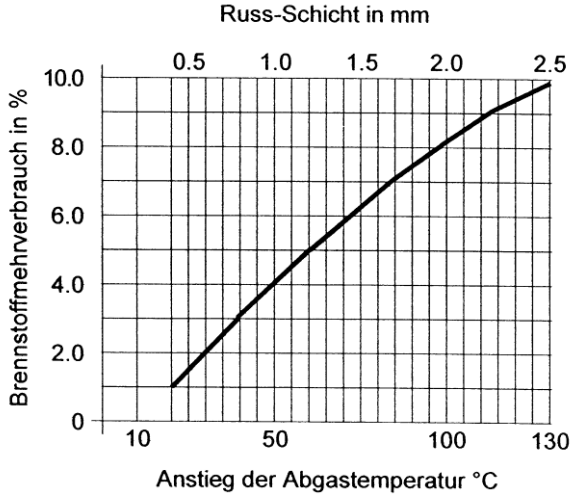


Bild 17.2 Zusammenhang von Russ-Schicht auf den Wärmetauschern, Brennstoffmehrverbrauch und Anstieg der Abgastemperatur im Kessel.

Der zusätzliche Reinigungsaufwand kann mit folgenden automatischen Anlagenteilen wesentlich reduziert werden:

- Unterrostentaschung für den Rostdurchfall bei Rostfeuerungen
- Feuerraumentaschung für Unterschubfeuerungen und Rostfeuerungen

Wartungsvertrag (Servicevertrag)
Im Wartungsvertrag (Servicevertrag) wird die periodische Wartung der Anlagenteile durch den Anlagelieferanten vereinbart.

Durch die periodische Wartung soll ein störungsfreier Betrieb ermöglicht werden, welcher zu keinen Schäden an den Anlagenteilen führt. Das Sicherstellen der technischen Funktionstüchtigkeit ist durch den Ersatz von Verschleissteilen zu gewährleisten.

Umfang des Wartungsvertrages für eine automatische Holzkesselanlage
Innerhalb eines Zeitintervalls von zwei Jahren sind an einer automatischen Holzkesselanlage mindestens folgende Wartungsarbeiten vorzunehmen (siehe auch Kapitel 5):

- **Revision**: Bei der Revision werden die Anlagenkomponenten bei Stillstand der Anlage zum Beispiel im Sommer bezüglich Abnützung und Funktionstüchtigkeit des Fördersystems, des Feuerraums, des Feuerungsrostes, des Kessels und der Sicherheitseinrichtungen überprüft.
- **Emissionswartung**: Bei der Emissionswartung wird die Funktionstüchtigkeit der Anlage im Betrieb bezüglich Verbrennungsqualität und feuerungstechnischem Wirkungsgrad, Steuerung, Sicherheitseinrichtungen wie Rückbrandsicherung oder Sicherheitsthermostat überprüft. Eventuell ist es notwendig, neue Einstellwerte für die Verbrennungsregelung vorzugeben.

Eine zusätzliche Fernwartung durch den Feuerungshersteller ist eine wichtige Unterstützung des Betriebspersonals bei der Behebung von Störungen und der Betriebsoptimierung und umfasst folgende Tätigkeiten:

- Ferndiagnose
- Kontrolle
- Fernzugriff und Beratung per Telefon
- Fernbedienung/Fernsteuerung

Ein Wartungsvertrag garantiert die Kontinuität dieser Arbeit. Auf diese Weise können Störungen auf ein minimales Mass reduziert, respektive mit der Fernwartung sofort auf Distanz behoben werden. Die Betriebssicherheit wird erhöht. Weitere Hinweise sind im Kapitel 5.10 und im Kapitel 16 zu finden.

Vertragspartner
Je nach Grösse und Komplexität der Anlage sowie Anzahl der Hauptunternehmer ist mehr als ein Wartungsvertrag für die Holzheizungsanlage notwendig. Mögliche Vertragspartner sind:

- Hersteller des Holzkessels mit Steuerung
- Hersteller der Siloaggregate (Füllen und Leeren des Silos, der Lagerhalle)
- Hersteller der Abgasbehandlung
- Hersteller der hydraulischen Einbindung
- Hersteller des Regel- oder Leitsystems
- Produktunabhängige, spezialisierte Firmen.

Unter Umständen ist mit allen oben aufgeführten Firmen ein Wartungsvertrag abzuschliessen. Die eingeschlossenen Leistungen der jeweiligen Wartungsverträge sind aufeinander abzustimmen.

Vertragsinhalt
Folgende Punkte soll ein Servicevertrag enthalten:

- Zweck
- Klare Beschreibung von Liefergrenzen und Leistungen (auch Garantien möglich!)
- Beschreibung von Ausschlüssen und Ausnahmen
- Ausweisen von Stundensätzen und Zulagen sowie Spesen
- Kosten
- Gültigkeit und Dauer
- Kündigung
- Verlängerung
- Kontaktadresse und Organisation für die Anforderung von Serviceleistungen im Notfall
- Pflichten des Betreibers
- Rechte des Unternehmers

17.3.3 Instandsetzung und Verbesserung

Periodische Erneuerung von Anlagenkomponenten wie Feuerraumausmauerung, Rostgliedern oder Pumpen mit gleichem Stand der Technik ist der Instandsetzung zuzuordnen. Werden hingegen Anlagenkomponenten durch einen neueren Stand der Technik ersetzt, so entspricht dies einer Verbesserung.

Der Anteil für Instandsetzung und Verbesserung beträgt als Richtwert 2 % der Investitionskosten der Wärmeerzeugung und macht somit die Hälfte der gesamten Instandhaltungskosten entsprechend Bild 17.1 aus. Weitere Hinweise dazu sind im Kapitel 10.3 zu finden.

17.4 Arbeitssicherheit

Die Arbeitssicherheit des Betriebspersonals wird wesentlich bestimmt durch das Beachten und Einhalten der länderspezifischen Anforderungen an die Sicherheitseinrichtungen der entsprechenden Anlagenteile bezüglich des Brandschutzes, der Unfallverhütung und des Explosionsschutzes (siehe auch Kapitel 19).

Zusätzlich ist der Arbeitshygiene hohe Beachtung zu schenken, da sie grossen Einfluss auf den Gesundheitszustand des Betriebspersonals hat. Das Betriebspersonal eines Holzheizwerks ist folgenden gesundheitsrelevanten Immissionen und Einflüssen ausgesetzt:

- Aschestaub bei der Kesselreinigung, dem Aschehandling, bei Wartungsarbeiten an der Abgasanlage und der Entaschungsanlage
- Holzstaub im Brennstofflager bei Brennstoffanlieferung, dem Brennstoffhandling, bei Wartungsarbeiten am Brennstofftransportsystem
- Schimmelpilz im Brennstofflager bei Brennstoffanlieferung, dem Brennstoffhandling, bei Wartungsarbeiten am Brennstofftransportsystem
- Lärm
- Gärgase im Brennstofflager und in angrenzenden Räumen
- Kohlenmonoxid im Pelletlager
- Anlagenteile mit hohen Temperaturen, respektive hoher Temperaturstrahlung.

Aschestaub, Holzstaub und Schimmelpilzsporen weisen Feinstaubpartikel auf, welche lungengängig sind und somit die Lungenfunktion beeinträchtigen können. Holzstaub und Schimmelpilzsporen können Allergien auslösen, welche den Gesundheitszustand der betroffenen Person schwächen können. Das Betriebspersonal hat folgende Vorkehrungen zu treffen:

- Tragen einer Schutzmaske, wenn es Immissionen von Aschestaub, Holzstaub und Schimmelpilzsporen ausgesetzt ist.
- Bei hohem Lärmpegel Ergreifen von Lärmschutzmassnahmen.
- Gute Durchlüftung vor dem Betreten von Brennstofflagern und Räumen mit möglicher hoher Gärgaskonzentration, damit eine mögliche Erstickungsgefahr verhindert werden kann.
- Einhalten der Sicherheitsbestimmungen aus der Lagerraumbroschüre Lagerung von Holzpellets [67] beim Betreten von Pelletlagern, damit Personenunfälle durch giftige CO-Konzentrationen verhindert werden können.
- Tragen einer entsprechenden Schutzkleidung mit Schutzschild beim Hantieren mit Anlagenteilen oder bei Arbeiten in unmittelbarer Nähe zu Anlagenteilen, welche hohe Temperaturen aufweisen, damit Verbrennungen an Körperteilen ausgeschlossen werden können.
- Stromlosschaltung oder Unterbrechung der Stromzufuhr bei der Störungsbehebung oder Wartungsarbeiten an Anlagenteilen mit elektrischen Antrieben.

17.5 Versicherungen

Für den langfristig gesicherten wirtschaftlichen Betrieb eines Holzheizwerkes müssen in jedem Fall auch entsprechende Versicherungen abgeschlossen werden. Dies hat insbesondere deshalb grosse Bedeutung, da meist vertragliche Wärmelieferverpflichtungen mit den Abnehmern eingegangen worden sind. Es lässt sich bei keinem Heizwerk gesichert vorhersagen, dass keine unerwarteten Störungen und Unterbrechungen auftreten können, welche die Wärmelieferung unterbrechen oder unwirtschaftlich machen. Folgende Versicherungen kommen in Frage:

- Bauwesen (während Bauphase)
- Feuer
- Feuer-Betriebsunterbruch
- Maschinenbruch
- Maschinenbruch-Betriebsunterbruch
- Betriebshaftpflicht
- Elementarschäden

Es empfiehlt sich, eine genaue Risikoabschätzung in Zusammenarbeit mit Experten durchzuführen.

Zusätzliche Versicherungspunkte sind:

- Mitversicherung von Nebenkosten im Schadensfall
- Mitversicherung von Sachverständigenkosten im Schadensfall
- Rechtsschutz
- Rohrleitungen

Empfehlenswert zu prüfen ist, ob eine Versicherungs-Rahmenvereinbarung für Holzheizwerke mit Wärmenetz mit folgendem Umfang abgeschlossen werden kann (sofern nicht schon in anderen Versicherungen enthalten):

- Gebäudeversicherung (in der Regel obligatorisch)
- Inhaltsversicherung
- Betriebsunterbrechungsversicherung
- Mehrkosten-Betriebsunterbrechungsversicherung
- Haftpflichtversicherung
- Spezial-Strafrechtsschutzversicherung

Die Vereinbarungen in den Versicherungsverträgen sind genau einzuhalten. Neben allen gesetzlichen Vorschriften (insbesondere auch wiederkehrende Prüfungen und Dokumentation – Kapitel 17.3.2) sind auch allenfalls von Versicherungen zusätzlich geforderte Auflagen zu beachten, um den Versicherungsschutz zu gewährleisten.

18 Optimierung und Erneuerung bestehender Anlagen

18.1 Erläuterungen

Neue Anlagen, die im Rahmen von QM Holzheizwerke geplant und realisiert werden, führen in den ersten Betriebsjahren die in Kapitel 16 beschriebene **Betriebsoptimierung** durch. Dabei wird überprüft, ob die Anlage im aktuellen Ausbaustand des Wärmenetzes die technischen und ökonomischen Zielwerte von QM Holzheizwerke erreicht. Wird die Anlage entsprechend dieser Vorgaben und Zielwerte errichtet, stehen die für diese Beurteilung notwendigen Betriebsdaten zur Verfügung.

Das vorliegende Kapitel ist für bestehende Anlagen vorgesehen, die bereits seit einigen Jahren in Betrieb stehen, und unabhängig davon, ob eine Begleitung mit QM Holzheizwerke erfolgte. Damit bestehende Anlagen im sich laufend ändernden ökonomischen, technischen und energiepolitischen Umfeld zukunftsfähig bleiben, müssen die wichtigsten Anlagenkomponenten der Wärmeerzeugung und Wärmeverteilung periodisch bezüglich Technik und Wirtschaftlichkeit überprüft und Optimierungspotenziale aufgezeigt und ausgeschöpft werden. Verdichtung oder Erweiterung der Wärmeversorgung, Neuerungen beim Stand der Technik, neue gesetzliche Vorschriften wie die Verschärfung von Emissionsgrenzwerten oder das Verbot beziehungsweise sinkende Akzeptanz fossiler Brennstoffe, hoher Verschleiss von Anlagenkomponenten, Häufung von Betriebsproblemen oder Anlagenausfällen oder neue Besitzverhältnisse können eine weitergehende, vertiefte Überprüfung (**Status-quo-Analyse**) der Anlage auslösen. Diese kann ergeben, dass gewisse Teile optimiert werden sollen (**Optimierung bestehender Anlagen**), oder auch zum Schluss kommen, dass einzelne Anlagenteile oder die komplette Anlage erneuert werden müssen (**Erneuerung bestehender Anlagen**).

Die nachfolgenden Kapitel beschreiben Vorgangsweisen, Hilfsmittel und Massnahmen und sollen der Planerin oder dem Planer aufzeigen, wie sie das Anlagenbetriebspersonal bei der Optimierung und/oder Erneuerung der Anlage unterstützen können. Ausgangspunkt ist dabei immer eine Status-quo-Analyse entsprechend Kapitel 18.2.2, die im Falle einer Anlagenerneuerung entsprechend Kapitel 18.3.2 zu erweitern ist.

18.2 Optimierung von bestehenden Anlagen

18.2.1 Vorgehen

Zur Optimierung von bestehenden Anlagen sind folgende Schritte notwendig:

- Status-quo-Analyse der bestehenden Technik und der aktuellen wirtschaftlichen Situation
- Beurteilung der Resultate der Status-quo-Analyse, wenn möglich mittels Benchmark-Vergleich
- Optimierungsmassnahmen mit Kosten-/Nutzen-Analyse aufzeigen, bei Bedarf in Teilbereichen vertiefte Abklärungen durchführen.
- Optimierungsmassnahmen umsetzen und Erfolgskontrolle durchführen.

Die Optimierung sollte von erfahrenen Expertinnen oder Experten durchgeführt werden. Um zielführende und verlässliche Ergebnisse zu erhalten, ist eine gute Zusammenarbeit mit dem Betriebspersonal notwendig. Dieses muss die erforderlichen Informationen zur Verfügung stellen. Sollten sicherheitsrelevante Mängel jedweder Art erkannt werden, besteht eine Hinweispflicht gegenüber den Anlagenverantwortlichen, sodass entsprechende Mängel umgehend schriftlich zu übermitteln sind.

18.2.2 Status-quo-Analyse von Technik und Ökonomie

Grundlage jeder Analyse ist eine aktuelle und umfassende Datenbasis und eine Abschätzung der künftigen Entwicklung. Somit müssen die nachfolgend aufgeführten Daten und Informationen für die Status-quo-Analyse möglichst vollständig beschafft werden.

Allgemeinzustand der Anlage

Für die Beurteilung sind eine Beschreibung des Allgemeinzustandes der Anlage, der Stand der Anlagentechnik und der Ausstattung, die allgemeine Beschreibung der aktuellen Situation und möglicher Problemstellungen, sofern diese nicht in den nachfolgenden Punkten im Detail erfasst werden, und aktuelle bzw. zukünftige Erweiterungspläne relevant. Ein Anlagenrundgang bietet einen Überblick über den Ist-Zustand.

Wärmeerzeugung

- Beschreibung der Wärmeerzeuger
- Baujahr und allgemeiner Zustand, Nennleistungen, Zusatzkomponenten (Feinstaubabscheider, Economiser usw.), Emissionsmessungen, Protokolle von Betriebsstörungen und Reparaturen
- Basis- und Jahresdaten, die für die Excel-Tabelle Situationserfassung (siehe Kapitel 11) benötigt werden
- Betriebsdaten, die im Rahmen einer Betriebsoptimierung (siehe Kapitel 16) benötigt werden
- Hydraulikschema, Standard-Schaltung, Funktions-/Regelungsbeschreibung
- Prüfung der Platzverhältnisse, -reserven in der Heizzentrale und am Standort
- Prüfung der Sicherheitsaspekte in der Heizzentrale inklusive Brennstofflager (länderspezifische Vorschriften in Kapitel 19)

Brennstoff und Asche

- Logistik der Brennstoffversorgung und Ascheentsorgung
- Brennstoffbedarf eines Betriebsjahres (Menge, Art, Qualität)
- Brennstoffqualität gemäss Brennstofflieferver trag
- Brennstoffanalyse durchführen und Brennstoffqualität der Klassifizierung gemäss QMH (Kapitel 4) zuordnen
- Lagerkapazitäten brutto, netto von Silo, Lagerhallen, Aussenlager
- Protokolle von Betriebsstörungen im Bereich Silo und Brennstofftransport bis zur Feuerung sowie der Aschefördereinrichtung

Wärmeverteilung

- Netzplan mit Angabe von Leitungsdimensionen und Temperaturniveaus
- Basis- und Jahresdaten, die für die Excel-Tabelle Situationserfassung (siehe Kapitel 11) benötigt werden
- Betriebsdaten, die im Rahmen einer Betriebsoptimierung (siehe Kapitel 16) benötigt werden
- Allgemeiner Zustand des Wärmenetzes, der Leckageüberwachung, der Wärmeübergabestationen und der Wasserqualität
- Aufzeichnungen des erforderlichen Nachspeisevolumens
- Hydraulikschema einer typischen Wärmeübergabestation

Betrieb und Instandhaltung (Wartung, Inspektion, Instandsetzung (Unterhalt) und Verbesserung)

- Jährlicher Wartungsaufwand gemäss Kapitel 17.3.2
- Mittlerer jährlicher Instandsetzungsaufwand (Unterhaltsaufwand) und Verbesserungsaufwand gemäss Kapitel 17.3.3

Vertragliche und gesetzliche Rahmenbedingungen

- Trägerschaft, Rechtsform des Anlagebetreibers
- Brennstofflieferver trag
- Wärmelieferver trag mit Technischen Anschlussvorschriften und Tarifmodell
- Dienstbarkeiten
- Verträge über an Dritte abgegebene Dienstleistungen (Anlagenbetrieb/-betreuung, Wärmeabrechnung usw.)
- Gesetzliche Vorschriften (Emissionsgrenzwerte, Personen-, Brandschutzvorschriften und weitere gemäss Kapitel 19)
- Organisation des Anlagenbetriebs

Wirtschaftlichkeit

- Alle grundlegenden Daten für eine Wirtschaftlichkeitsrechnung (siehe Tool Wirtschaftlichkeitsberechnung, Kapitel 10)
- Effektive Energie-, Betriebs- und Wartungskosten sowie Erträge aus Anschlussgebühren und Wärmeverkauf
- Abschätzung der Entwicklung der kommenden fünf bis zehn Jahre

Erheben des Betriebsverhaltens von Wärmeerzeugung und Wärmeverteilung

Die Erfassung des Betriebsverhaltens soll sich an der Betriebsoptimierung gemäss Kapitel 16 und der FAQ 8 orientieren. Die Erfassung des Betriebsverhaltens hängt massgeblich davon ab, mit welcher messtechnischen Ausstattung das Heizwerk und das Wärmenetz ausgerüstet sind und in welcher Form die Betriebsdaten visualisiert werden können. Im besten Fall kann dies über ein Monitoring des Betriebsleitsystems erfolgen (siehe Kapitel 16.3). Werden nur wenige oder keine Betriebsdaten aufgezeichnet, dann muss sich die Beurteilung des Betriebsverhaltens abstützen auf:

- Beobachtungen des Betriebspersonals
- Gezielte Beobachtungen an ausgewählten Tagen im Winter, in der Übergangszeit und im Sommer.
- Temporäre, gezielte Messungen an ausgewählten Tagen im Winter, in der Übergangszeit und im Sommer, zum Beispiel mittels Langzeitmessungen gemäss QS Support Holzfeuerungen [141].

18.2.3 Beurteilung der Resultate der Status-quo-Analyse

In der Folge werden verschiedene Möglichkeiten beschrieben, wie die Resultate der Status-quo-Analyse in einen Bezug zu Kennwerten von QM Holzheizwerke gesetzt werden können.

Excel-Tabelle Situationserfassung

Die Excel-Tabelle *Situationserfassung* [110] berechnet die wichtigsten Kennzahlen der Anlage, vergleicht sie mit den Kennwerten von QMH und ermöglicht dadurch grobe Aussagen zu folgenden Aspekten:

- Vollbetriebsstundenzahl der Holzkessel: Welche Leistungsreserven sind in der Wärmeerzeugung vorhanden?
- Wie hoch ist der Holzanteil an der Jahreswärmeproduktion?
- Ist das Volumen des Wärmespeichers ausreichend?
- Ist der Betrieb des (kleinsten) Holzkessels im Sommer zulässig?
- Ist die Anschlussdichte des Wärmenetzes ausreichend?
- Wie hoch sind die Verluste der Wärmeverteilung?
- Wie hoch ist die Versorgungsautonomie des Brennstofflagers?
- Wie hoch ist die Wärmeversorgungssicherheit beim Ausfall des grössten Holzkessels?

Betriebsoptimierung gemäss Meilenstein MS5

Wenn die Erhebung der Betriebsdaten und des Betriebsverhaltens gemäss Kapitel 16 durchgeführt werden kann, können ebenfalls die wichtigsten Kennzahlen der Anlage mit Hilfe der Excel-Tabelle Situationserfassung erstellt

werden. Weitergehend werden auch Aussagen zum Betriebsverhalten möglich, wie zum Beispiel:

- Entspricht das Betriebsverhalten der Anlage dem Funktionsbeschrieb? Wo weicht es ab?
- Ist erhöhter Anlageverschleiss oder eine verkürzte Lebensdauer von Komponenten wie Feuerraumauskleidung, Gewölbesteinen, Rostelementen, Ascheschnecke usw. zu erwarten?
- Treten hohe Lastspitzen und Lastabsenkungen im Wärmenetz auf?
- Erreicht der Elektroabscheider die erwartete Jahresverfügbarkeit?
- Liegt der Stromverbrauch der Anlage im erwarteten Bereich?

Hilfreiche Hinweise zur Durchführung der Betriebsoptimierung sind in der FAQ 8 [142] zu finden.

Kosten für Wartung und Instandhaltung (siehe Kapitel 17)

Wenn Angaben zu den mittleren Jahreskosten für Wartung und Instandsetzung vorliegen, können diese Werte mit den entsprechenden Diagrammen verglichen werden und erlauben dadurch Aussagen wie beispielsweise:

- Liegen die mittleren Jahreskosten für Wartung im zu erwartenden Bereich?
- Gibt es Potenzial, diese zu reduzieren?
- Liegen die mittleren Jahreskosten für Instandsetzung (Unterhalt) im zu erwartenden Bereich?
- Können diese durch eine Betriebsoptimierung reduziert werden?

Beratungstool Erneuerung Holzenergieanlagen

Im Beratungstool Erneuerung Holzenergieanlagen [16] werden die wichtigsten technischen Anlagendaten zur Wärmeerzeugung und Wärmeverteilung sowie zur Wirtschaftlichkeit eingetragen. Das Tool berechnet daraus die wichtigsten technischen und wirtschaftlichen Kenndaten und vergleicht sie mit den Zielwerten von QMH. Die Resultate werden auch grafisch dargestellt, sodass rasch erkannt wird, ob die Kennwerte der Anlage im erwarteten Bereich liegen oder ob sie eine obere oder untere Grenze über- oder unterschreiten. Die Resultate sowie mögliche Optimierungs- oder Erneuerungsmassnahmen werden mit dem Anlagebetreiber besprochen.

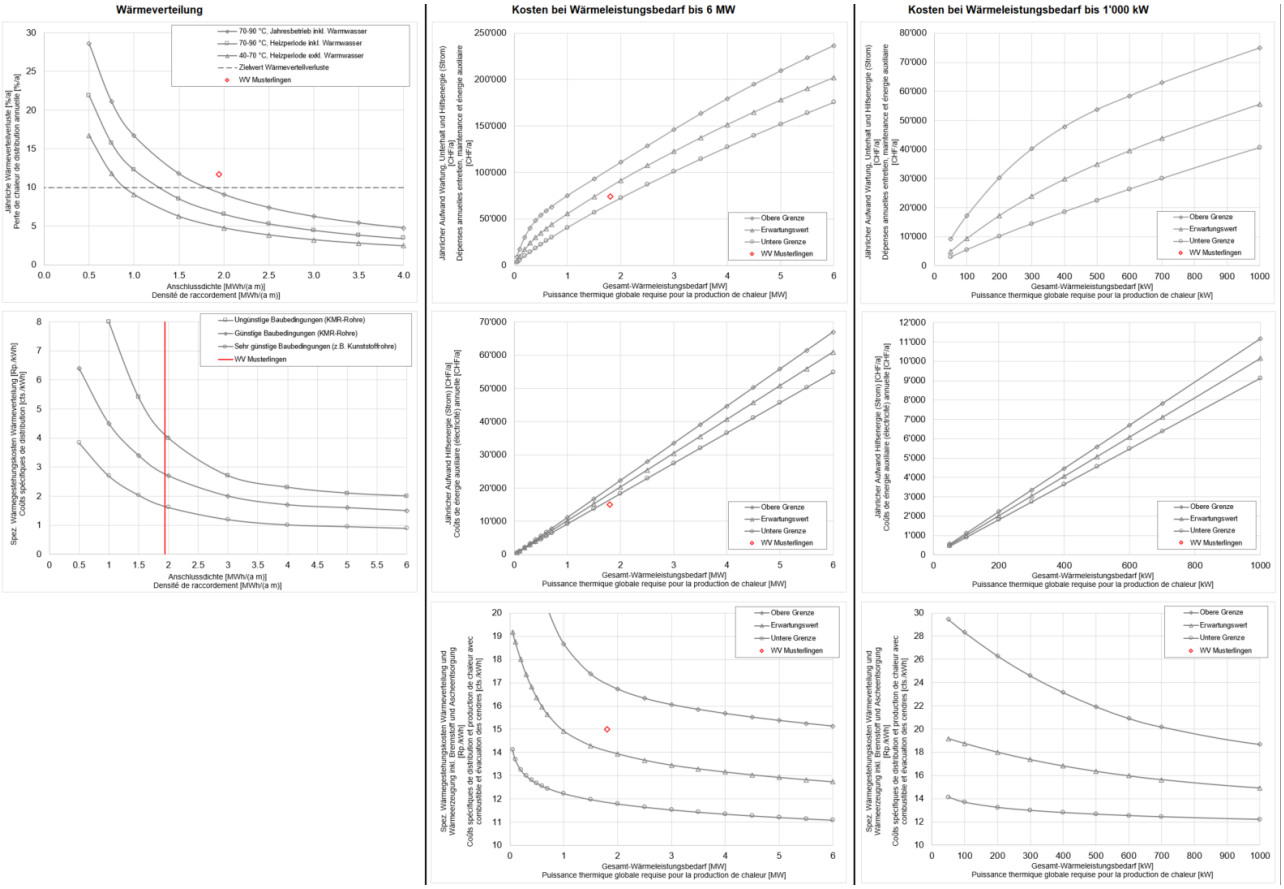


Bild 18.1 Auszug aus dem Beratungstool Erneuerung Holzenergieanlagen [16].

Heizwerksberatungen durch Qualitätsbeauftragte in Österreich

In Österreich werden durch den Bund beziehungsweise im Rahmen der Förderprogramme der Länder Beratungen für (ältere) Holzheizwerke angeboten. Diese Beratungen werden durch unabhängige Expertinnen und Experten (Qualitätsbeauftragte von klimaaktiv QM Heizwerke) durchgeführt. Neben der Prüfung von Anlagendaten und relevanten Unterlagen wird auch eine eintägige Begehung der Anlage durch die Expertin oder den Experten vorgenommen. Abschliessend liegt ein schriftlicher Bericht mit Empfehlungen zu Optimierungsmassnahmen vor.

Benchmark-Vergleich aus Betriebsdaten in der QM Heizwerke Datenbank

Die Abwicklung des QM-Prozesses wird in Österreich durch die klimaaktiv QM Heizwerke Datenbank unterstützt, in der alle relevanten technischen und wirtschaftlichen Anlagendaten erfasst und dokumentiert sind (siehe Kapitel 2.3.6). Dazu gehört auch die jährlich verpflichtende Bekanntgabe der wesentlichsten Betriebsdaten. Darauf basierend werden automatisiert wichtige Kennzahlen berechnet und zum Vergleich mit Zielwerten und Vergleichswerten anderer Heizwerke (Benchmarks) als Information für Betriebspersonal, Planerinnen und Planer und Qualitätsbeauftragte aufbereitet. Bild 18.2 zeigt einen beispielhaften Auszug von Benchmarks eines Heizwerks zum spezifischen Stromverbrauch der Gesamtanlage.

Ziel dieses Services des Programmmanagements von klimaaktiv QM Heizwerke ist es, insbesondere dem Betriebspersonal einen Überblick zum Status quo der Anlage (und ihrer Entwicklung während der vergangenen Jahre) zu geben und sie zur Beschäftigung mit den Betriebsdaten ihrer Anlage zu motivieren (siehe auch [143]). Mit Hilfe der Benchmarks ist es möglich, Optimierungspotenziale im Kontext der jeweiligen standortspezifischen Rahmenbedingungen zu identifizieren – gegebenenfalls mit Unterstützung von Expertinnen und Experten.

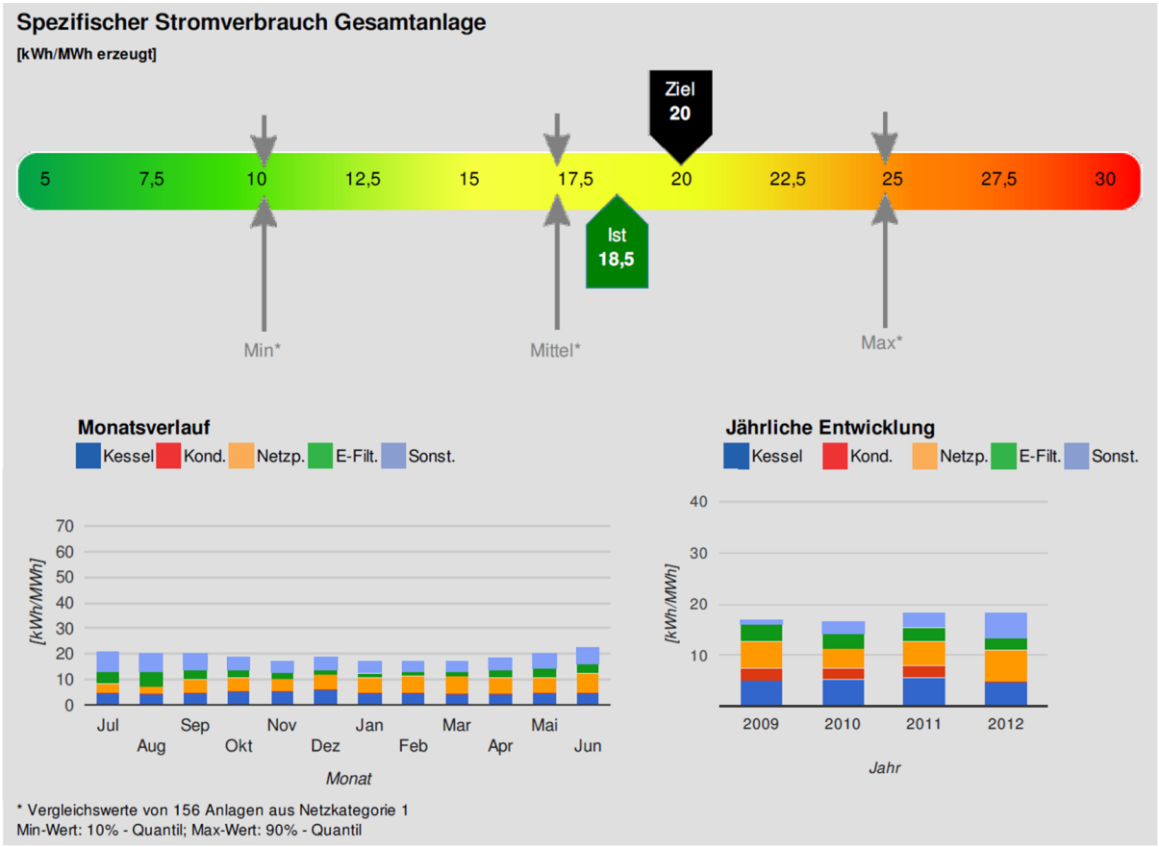


Bild 18.2 Beispiel einer Auswertung von klimaaktiv QM Heizwerke Benchmarks (Quelle: AEE INTEC).

Qualitätsanalyse von Biomasseheizwerken

Für Holzheizwerke in Deutschland bietet C.A.R.M.E.N. e.V. den Betreibern eine sogenannte Betriebsanalyse an [144]. Das Vorgehen orientiert sich an den in Österreich durchgeführten Heizwerksberatungen, der Umfang der Analyse kann individuell mit den Bedürfnissen des Betriebspersonals abgestimmt werden.

Excel-Tool Wirtschaftlichkeitsberechnung

Das Tool Wirtschaftlichkeitsberechnung [145] zeigt die aktuellen wirtschaftlichen Aspekte der Anlage und die mögliche weitere Entwicklung vertieft auf. Es macht zwar keine Optimierungsempfehlungen, kann aber sehr einfach aufzeigen, wie sich kostensenkende oder ertragssteigernde Massnahmen/Investitionen auf die Wirtschaftlichkeit der Anlage auswirken werden.

Vertiefte Abklärungen

Die Beurteilung der Unterlagen und der Resultate der Status-quo-Analyse kann zum Schluss kommen, dass vertiefende Abklärungen notwendig sind, wie etwa:

- Besichtigung/Begehung der Anlage und einer typischen Übergabestation
- Zusätzliche, ausgewählte Messungen zur vertieften Beurteilung des Betriebsverhaltens
- Vertiefte Wärmenetzanalyse mittels Analyse-Tools wie THENA [107], Sophena [103], Mehrverbrauch [146] usw.:
  - Ermittlung von mangelhaften Wärmeübergabestationen
  - Ermittlung von Potenzialen in bestehenden Wärmenetzsträngen zum Anschluss zusätzlicher Wärmeabnehmer

18.2.4 Massnahmen zur Optimierung von bestehenden Anlagen

18.2.4.1 Kostensenkende Massnahmen

In vielen Fällen wird die Optimierung einer bestehenden Anlage durch mangelnde Wirtschaftlichkeit ausgelöst. Im Vordergrund stehen dann zunächst Massnahmen, welche Kosten senken. Kostensenkende Massnahmen umfassen:

Konforme Brennstoffqualität sicherstellen

Die Verwendung günstiger Brennstoffsortimente mit niedriger Qualität, die nicht der Spezifikation der Feuerung entsprechen, kann zu Betriebsstörungen, erhöhtem Wartungsaufwand und Verschleiss sowie unzulässigen Emissionen führen und dadurch die Wirtschaftlichkeit der Anlage verschlechtern.

- Brennstoffqualität überprüfen/analysieren
- Verwendung einer Brennstoffqualität, die für das Transportsystem und den Feuerungstyp geeignet ist
- Häufige Prüfung des Wassergehalts, periodische Prüfung von Feinanteil, Überlängen und Fremdanteil
- Konsequentes Zurückweisen von nichtkonformen Brennstoffen.

Brennstoffverbrauch reduzieren

- Jahresnutzungsgrad der Holzkessel steigern:
  - Lange Betriebslaufzeiten durch geeignete Leistungsregelung in Kombination mit ausreichend dimensioniertem Wärmespeicher (bei Bedarf Wärmespeicher mit Speicherlademanagement nachrüsten)
  - Restsauerstoffgehalt im Abgas in allen Leistungsbereichen durch den Feuerungslieferanten absenken (Optimierung Feuerungsregelung, Luftstufung, Abgasrezirkulation), jährliche Nachkontrolle, Sauerstoffmessung (O_2-Sonde, Lambda-Sonde) regelmässig auf Korrektheit prüfen, Dichtheit und Falschlufteintrag überprüfen
  - Abgastemperatur laufend beobachten und durch geeignete, automatisierte Kesselreinigungsmassnahmen oder bei Bedarf durch verkürzte Intervalle der Kesselreinigung absenken
  - Nachrüstung von effizienzsteigernden Massnahmen prüfen (z. B. Economiser, Abgaskondensation)
  - Prüfen, ob der Holzkesselbetrieb die Anforderungen für den Betrieb im Sommer mit trockenem Brennstoff erfüllt. Falls nicht:
    - Sommerbetrieb mit einem bestehenden fossilen Kessel, der künftig nach Möglichkeit mit gasförmigen oder flüssigen Biobrennstoffen betrieben wird
    - Nachrüstung eines kleineren Holzkessels für den Sommerbetrieb prüfen
    - Alternative, dezentrale Warmwasserbereitstellung für den Sommerbetrieb prüfen und das Wärmenetz im Sommer nicht betreiben.
- Verluste des Wärmenetzes senken:
  - Vorlauftemperatur des Wärmenetzes witterungsgeführt regeln und auf das minimal notwendige Temperaturniveau absenken.
  - Rücklauftemperatur des Wärmenetzes senken:
    - Lokalisieren mangelhafter Wärmeübergabestationen anhand einer Analyse der Wärmeabnehmerinnen und -abnehmer auf deren Mehrverbrauch (siehe Planungshandbuch Fernwärme [19] Kapitel 10)
    - Kontrolle der Funktionstauglichkeit der primärseitigen Einrichtungen bei den Wärmeübergabestationen
    - Hydraulische Umrüstung von sekundärseitig mangelhaften Wärmeübergabestationen
  - Technische Anschlussvorschriften der Wärmeübergabestationen bezüglich maximal zulässiger Rücklauftemperaturen durchsetzen oder bei Bedarf einführen. Bei zu geringer Anschlussdichte des Wärmenetzes eine alternative, dezentrale Warmwasserbereitstellung für den Sommerbetrieb prüfen und das Wärmenetz im Sommer nicht betreiben
  - Fernwärmerohre mit höchsten Dämmstandards beim Ausbau des Wärmenetzes oder der Erneuerung von Rohrleitungen verwenden

Senkung der Kosten für Wartung und Instandsetzung (Unterhalt)

- Optimierung der manuellen Reinigungsintervalle über Beobachtung der Abgastemperatur. Einsatz von Hilfsgeräten nutzen
- Manuelle Reinigungsarbeiten nach Möglichkeit durch geeignete Nachrüstungen automatisieren
- Nachrüstung einer automatischen Zündung des Holzkessels prüfen
- Störungen im Brennstofftransportsystem durch konforme Brennstoffqualitäten verringern. Sensorik im Brennstofftransportsystem optimal positionieren und geeignet einstellen

- Regelmässige Kontrolle/Revision der Anlagenkomponenten (Servicevertrag zur Früherkennung und Behebung von Schäden)
- Sicherstellen einer hohen Wasserqualität (Wärmeträgermedium) zur Vermeidung von Schäden (Korrosion, Ablagerungen an Wärmezählern und Armaturen, Überhitzung im Kesselbereich)
- Verschleissarme und wartungsarme Betriebsweise der Anlage sicherstellen:
  - durch geeignete Einstellung der Regelungsparameter, damit der Holzkessel jederzeit mit einem stabilen Brennstoffbett ohne Bildung von Hotspots (Vulkane) oder Schlacke betrieben werden kann
  - durch Nachrüsten eines Wärmespeichers mit geeignetem Speicherlademanagement, um lange, kontinuierliche Kesselbetriebszeiten mit wenig Start/Stopp-Phasen zu erreichen.

Kosten für Stromverbrauch senken

- Hohe Temperaturspreizung zwischen der Vor- und Rücklauftemperatur des Fernwärmenetzes anstreben, nach Möglichkeit durch Massnahmen, die die Rücklauftemperatur des Fernwärmenetzes (primärseitig) absenken
- Temperaturspreizung zwischen der Vor- und Rücklauftemperatur des Holzkessels von maximal 15 K bei Nennleistung anstreben
- Geeignete Differenzdruckregelung der Fernleitungspumpen anwenden
- Geeignete Dimensionierung der jeweiligen Fernleitungspumpe für Winter- und Sommerbetrieb anwenden
- Einsatz energieeffizienter Antriebe und Aggregate (Ventilatoren, Pumpen, Fördertechnik, Kompressoren usw.)
- Drehzahlregelung für Ventilatoren (anstatt Drosselklappen)
- Vermeidung unnötiger Druckverluste in der hydraulischen Verrohrung und in den Abgaskanälen
- Vermeidung von Falschlufteintrag bei Feuerungen, Abscheidesystemen und in den Abgaskanälen
- Vermeidung von Druckluftleckagen

18.2.4.2 Ertragssteigernde Massnahmen

Eine mangelnde Wirtschaftlichkeit erfordert aber auch ertragssteigernde Massnahmen. Dazu gehören:

Überprüfung Tarifmodell

- Wärmelieferverträge (Tarifmodell und Tarifgestaltung) prüfen und bei Notwendigkeit anpassen:
  - Witterungsabhängigkeit der jährlichen Erträge verringern
  - Tarifanpassungen über geeignete Indexierung vornehmen

Genauigkeit der Wärmezähler sicherstellen

- Sicherstellung einer hohen Wasserqualität:
  - Funktionstüchtigkeit der wasseraufbereitenden Einrichtungen (Magnetflussfilter, Entgasung usw.) sicherstellen. Bei Bedarf entsprechende Einrichtungen nachrüsten
  - Wasserqualität periodisch prüfen
- Konforme Position der Wärmezähler prüfen und Wärmezähler gemäss den gesetzlichen Vorgaben nachkalibrieren lassen

Leistungsreserven in der Wärmeerzeugung und -verteilung ausschöpfen – Netzverdichtung

- Leistungsreserven im Wärmenetz oder in Teilsträngen mit Hilfe geeigneter Netzanalyse-Tools prüfen (z. B. THENA [107] oder andere)
- Netzverdichtung durch Akquisition geeigneter Wärmekunden im Perimeter des bestehenden Wärmenetzes

Ausbau von Wärmeerzeugung und -verteilung – Netzerweiterung

- Mit Hilfe geeigneter Netzanalyse-Tools lassen sich die noch verfügbaren Reserven im Wärmenetz aufzeigen und potenzielle Wärmekundinnen und -kunden besser identifizieren. Erweiterung des Wärmenetzes soll nur in Betracht gezogen werden, falls die technischen Kennwerte von QMH und ein vertraglich zugesicherter Wärmeverkauf von 60 % des neu zu erschliessenden Wärmepotenzials erreicht werden.
- Sicherstellen, dass der/die Holzkessel ihre Nennleistung erreichen
- Ausbau der Wärmeerzeugungsleistung:
  - Brennstoffversorgungskapazitäten prüfen
  - Platzreserve im Heizraum für einen zusätzlichen Holzkessel oder für den Ersatz eines bestehenden Holzkessels durch einen grösseren Holzkessel prüfen
  - Erst dann durchführen, wenn die erwarteten jährlichen Vollbetriebsstundenzahlen der bestehenden Holzkessel erreicht werden

18.2.4.3 Weitere Massnahmen

Weitere Massnahmen sind ebenfalls in Betracht zu ziehen und umfassen folgende:

Betriebssicherheit und Sicherheit der Wärmeversorgung gewährleisten

- Analyse und Behebung von Sicherheitsmängeln für Personen und Maschinen
- Bei Heizwerken ohne fossile Heizkessel Anschlüsse für den Einsatz einer mobilen, externen Heizzentrale vorsehen
- Betriebsorganisation so einrichten, dass bei ferien- oder krankheitsbedingten Abwesenheiten der Betrieb gewährleistet bleibt

Hohen erneuerbaren Anteil an der Jahreswärmeproduktion sicherstellen

- Sicherstellen, dass der fossile Heizkessel bei Spitzenlastbedarf so spät wie nötig zugeschaltet und so früh wie möglich weggeschaltet wird

Verminderung von Emissionen

- Die aufgeführten Massnahmen tragen dazu bei, unerwünschte Emissionen im regulären Betrieb sowie in den instationären Betriebsphasen der Holzkessel zu verringern.
- Nachrüstung von Staubabscheidern auch ohne verschärfte gesetzliche Anforderungen prüfen, um die Akzeptanz von Holzfeuerungsanlagen proaktiv zu erhöhen.

Kaufmännisch/administrative Massnahmen

- Regelmässige Überprüfung der Ausgaben und der Kostenstruktur und möglicher Einsparungspotenziale
- Allenfalls Finanzierung neu organisieren
- Optimierung der Stromtarife durch Tarifvergleich und gemeinsamen Stromeinkauf/Strompooling (z. B. über Betreiberverbände). Dabei sollte zertifiziertem Ökostrom der Vorzug gegeben werden.
- Kooperation mehrerer Anlagen bei der Ersatzteilhaltung, der gemeinsamen Ascheentsorgung und beim Brennstoffeinkauf
- Optimierung von Versicherungstarifen und anderen Ausgaben
- Einsatz von Softwaretools zur Vereinfachung der Wärmeabrechnung und Betriebsführung

18.3 Erneuerung von bestehenden Anlagen

18.3.1 Einleitung

Die in Kapitel 18.2 beschriebene Analyse und Beurteilung von bestehenden Anlagen zielen darauf ab, die bestehenden Anlagenkomponenten der Wärmeerzeugung und der Wärmeverteilung zu optimieren und dadurch die technische und wirtschaftliche Situation der Gesamtanlage zu verbessern. Die Beurteilung kann allerdings auch zum Schluss kommen, dass einzelne Anlagenkomponenten oder sogar die gesamte Anlage erneuert werden sollen. In den meisten Fällen geht es dabei um den Bereich der Wärmeerzeugung.

Folgende Gründe können auch ohne vorgängige Analyse einer Anlage dazu führen, dass das Nachrüsten einzelner Komponenten, eine Teilerneuerung oder sogar eine Gesamterneuerung der Wärmeerzeugung bevorsteht:

- Anhaltende ökonomische Schwierigkeiten
- Ablauf der zu erwartenden Lebensdauer von Komponenten oder Holzheizkesseln
- Veränderte gesetzliche Vorschriften, zum Beispiel bezüglich Emissionsgrenzwerten, Wärmespeicherpflicht, Nachweispflicht des Betriebs der Staubabscheidung, Einschränkung des Einsatzes fossiler Brennstoffe
- Nachbarschaftsklagen infolge Lärm- oder Geruchsbelästigung im näheren Umfeld der Heizzentrale
- Bevorstehender Ablauf von Sanierungsfristen zur Umsetzung von behördlichen Verfügungen, beispielsweise Nachrüsten von Staubabscheidern und/oder Wärmespeichern

Wenn eine Teilerneuerung oder eine Gesamterneuerung einer bestehenden Anlage erfolgen wird, soll gleichzeitig auch immer das in Kapitel 18.2 aufgezeigte Optimierungspotenzial untersucht und nach Möglichkeit ausgeschöpft werden.

18.3.2 Vorgehen bei einer Erneuerung

Auch wenn auf den ersten Blick nur die Erneuerung einer einzelnen Komponente in Betracht gezogen wird, ist in jedem Fall eine gesamtheitliche Analyse der Anlage durch eine Expertin oder einen Experten notwendig. Zur Erneuerung von bestehenden Anlagen sind folgende Schritte notwendig:

- Status-quo-Analyse der bestehenden Technik und der aktuellen wirtschaftlichen Situation
- Beurteilung der Resultate der Status-quo-Analyse
- Erneuerungs- und Sanierungsmassnahmen mit Kosten-/Nutzen-Analyse aufzeigen (bei Bedarf in Teilbereichen vertiefte Abklärungen durchführen) und eine Erneuerungsstrategie empfehlen
- Erneuerungsstrategie umsetzen und Erfolgskontrolle durchführen

Falls eine umfassende Erneuerung einer bestehenden Anlage in Betracht gezogen wird, ist das Vorgehen grundsätzlich gleich zu wählen wie bei der Realisierung einer Neuanlage. Es ist dann der gesamte in Teil 3 des Planungshandbuches beschriebene Planungsablauf zu durchlaufen. Es wird grundsätzlich empfohlen, die Erneuerung einer Anlage mit QM Holzheizwerke begleiten zu lassen.

Status-quo-Analyse mit Beurteilung der Resultate
In einem ersten Schritt kann das in Kapitel 18.2.3 aufgeführte Beratungstool Erneuerung Holzenergieanlagen angewendet werden, um erste Schwerpunkte für mögliche Erneuerungs- und Sanierungsmassnahmen aufzuzeigen. In einem zweiten Schritt ist die in Kapitel 18.2.2 beschriebene detaillierte Status-quo-Analyse von Technik und Ökonomie durchzuführen. Die Beurteilung der Resultate soll zusätzlich folgende Aspekte berücksichtigen:

- **Situationserfassung** (siehe Kapitel 11): Zusätzlich zum Jahreswärmebedarf und Wärmeleistungsbedarf der aktuellen Anlage ist insbesondere die mittel- und langfristige Entwicklung des potenziellen Wärmeversorgungsgebietes miteinzubeziehen, also künftige thermische Gebäudesanierungen ebenso wie die künftige Entwicklung von Wohnraum, Gewerbe und Industrie im Wärmeversorgungsgebiet. Dabei ist abzuwägen zwischen möglichst realistischer Einschätzung der künftigen Entwicklung und unnötigen, zu grossen Reserven.

- **Wärmeverteilung** (siehe Kapitel 12): Zusätzlich zur Verdichtung im bestehenden Wärmenetz ist auch die Erweiterung des bestehenden Wärmenetzes zu prüfen. Dazu sind vertiefende Abklärungen zum Leistungspotenzial im bestehenden Wärmenetz mittels Analyse-Tools wie THENA [107], Sophena [103] oder anderen notwendig. Falls im näheren/weiteren Umkreis des bestehenden Wärmenetzes andere Wärmenetze in Betrieb sind, soll auch ein möglicher Zusammenschluss mit diesen Netzen geprüft werden. Bei hohen Leckageraten, Häufungen von Rohrbrüchen oder Unklarheiten bezüglich des Zustandes des Wärmenetzes und der noch zu erwartenden Lebensdauer wird empfohlen, eine vertiefende Analyse des Wärmenetzes mit Hilfe von Expertinnen oder Experten und spezialisierten Unternehmen durchzuführen.
- **Wärmeerzeugung** (siehe Kapitel 13): Die Analyse soll alle vorhandenen Systeme und Komponenten der Heizzentrale umfassen, also Wärmeerzeuger, Speicher, Hydraulik, Pumpen, Brennstoff- und Aschelogistik, MSR-Systeme, Prozessvisualisierung. Vertiefende Abklärungen sollen aufzeigen,
  - in welchem Zustand sich die vorhandenen Systeme und Komponenten befinden und ob sie mittel- oder langfristig weiterverwendet werden können.
  - ob Massnahmen zur Effizienzsteigerung/Wärmerückgewinnung realisiert werden können.
  - ob die vorhandenen Speicherkapazitäten ausreichen oder zusätzliche Speicherkapazitäten einen Vorteil bringen.
  - ob Massnahmen zur Reduktion des Aufwands für Wartung und Instandsetzung realisiert werden können.
  - ob Massnahmen zur Reduktion der Lärmemissionen des Holzheizwerkes realisiert werden können.
  - ob Massnahmen zur Vermeidung von Geruchsbelästigung umgesetzt werden können (Kaminerhöhung, optimierter Verbrennungsprozess).
  - ob potenzielle alternative Wärmequellen eingebunden werden können.
  - ob die Regelungs- und Datenerfassungssysteme modernisiert werden können.
  - ob eine geeignete Staffelung verschiedener Massnahmen möglich ist und wie die Wärmeversorgung während der Erneuerung der Anlage sichergestellt werden kann.
- **Brennstoff** (siehe Kapitel 4): Es ist abzuklären, wie sich das künftig verfügbare Holzpotenzial entwickelt und ob sich die verfügbare Brennstoffqualität für bestehende und/oder neue Komponenten eignet.
- **Gebäude der Heizzentrale**: Es ist abzuklären, wie nicht weiter genutzte Komponenten aus der Heizzentrale entfernt und wie neue Komponenten eingebracht werden können. Falls notwendig sind entsprechende bauliche Massnahmen vorzusehen.
- **Wirtschaftlichkeit** (siehe Kapitel 10): Im Rahmen der Analyse der Wärmelieferverträge soll auch geprüft werden, ob der Anlagebetreiber die Wärmetarife anpassen kann.
- **Rechtliche Aspekte**: Es ist abzuklären, ob sich die gesetzlichen Rahmenbedingungen (z. B. Emissionsgrenzwerte, Genehmigungs- und Bewilligungsverfahren) verändert haben und wie sich dies auf potenzielle Erneuerungsmassnahmen auswirkt.

Erneuerungsstrategie in einer Machbarkeitsstudie aufzeigen

Eine Machbarkeitsstudie soll verschiedene Varianten von Erneuerungs- und Sanierungsmassnahmen mittels einer Kosten-Nutzen-Analyse bewerten und dabei folgende Punkte umfassen:

- Gesamtbeurteilung der bestehenden Anlage
  - Potenzial der bestehenden Anlage
  - Ausbaupotenzial Wärmenetz
  - Situation Wärmebezüger
  - Politische, gesellschaftliche Entwicklung
- Sanierungsmassnahmen aufzeigen (siehe Kapitel 11.2)
- Erneuerungsmassnahmen für die Wärmeerzeugung aufzeigen:
  - Partikelabscheider nachrüsten oder erneuern
  - Speicher nachrüsten, Speicherlademanagement nachrüsten oder verbessern
  - Brennstoffördersystem modifizieren oder ersetzen
  - Einzelne oder mehrere Holzkessel ersetzen
  - Nachrüstung gestufte Abgasrezirkulation (Primär/Sekundär)
  - Nachrüstung Wärmerückgewinnung
  - Optimierung der Hydraulik im Heizwerk
  - Neue Logistik für Entaschung und Aschetransportsystem inklusive Aschezwischenlagerung
  - Neue Wärmeträger/Wärmequellen einbinden
  - Möglichkeit zur Stromerzeugung prüfen
- Erneuerungsmassnahmen für die Wärmeverteilung aufzeigen:
  - Akquisition und Kundenbetreuung professionalisieren
  - Ausbauetappen definieren
  - Rücklauftemperatur absenken für Nachrüstung Wärmerückgewinnung
  - Langfristiges Sanierungs- und Modernisierungskonzept für das Wärmenetz erarbeiten. Dazu gehören unter anderem systematische Sanierung von Rohrabschnitten, Koordination mit anderen Bautätigkeiten (z. B. Strassensanierung) im Versorgungsgebiet, Ersatz von Wärmeübertragern, Reglern, Regelarmaturen beziehungsweise der gesamten Hausübergabestation
- Geeignete Staffelung einzelner Erneuerungsmassnahmen prüfen
- Aufzeigen, wie der Betrieb der Anlage während der Umbauphase sichergestellt wird
- Neue Dienstleistungen anbieten (Glasfaserinternetverbindung, Kabelverlegung in bestehendem Kabelleerrohr Wärmenetz, zusätzliches Kältenetz, Ausbau

von Serviceleistungen für Wärmekunden (sekundärseitige Optimierung oder Wärmeübertragerreinigung, E-Car-Sharing usw.))
- Empfehlung einer gemeinsamen Erneuerungs- und Sanierungsstrategie abgeben

Umsetzung der Erneuerungsstrategie
Die beschlossenen Erneuerungs- und Sanierungsmassnahmen sind umzusetzen, und es ist eine Erfolgskontrolle (z. B. durch Begleitung mit QM Holzheizwerke) durchzuführen.

18.3.3 Erneuerung nicht möglich

Die Machbarkeitsstudie kann zum Schluss kommen, dass eine Erneuerung auf Grund von technischen oder administrativen Rahmenbedingungen nicht oder nur unter sehr erschwerten Bedingungen durchgeführt werden kann. Gründe dafür sind etwa fehlender Platz in der Heizzentrale oder auf dem Grundstück, auslaufende Pachtverträge, fehlende oder nicht erreichbare Bau- oder Betriebsgenehmigungen, signifikante Änderung technischer oder gesetzlicher Rahmenbedingungen. Zudem ist es möglich, dass die Wirtschaftlichkeit einer Erneuerung oder die erforderliche Finanzierung nicht sichergestellt werden kann. In solchen Situationen müssen weitere Wege geprüft werden, um einen zukünftigen Betrieb der Anlage sicherzustellen.

Neubau der Wärmeerzeugung
Wenn die Erneuerung der bestehenden Wärmeerzeugung nicht möglich ist, soll geprüft werden, ob die bestehende Heizzentrale stillgelegt und am selben oder an einem anderen Standort im Bereich des bestehenden Wärmenetzes eine komplette Neuerrichtung erfolgen kann. Dies bietet die Möglichkeit, einen grundlegend neuen Planungsvorgang ohne technische und wirtschaftliche Einschränkungen auszulösen. Insbesondere wird dadurch die Möglichkeit geschaffen, das bestehende Wärmenetz zu verdichten und zu erweitern. Bei der Auslegung der neuen Wärmeerzeugung bietet sich die Chance, eine Anlage mit geringeren Betriebs- und Brennstoffkosten zu realisieren, weil:

- kostengünstigere Brennstoffsortimente verwendet werden können.
- die Brennstoff- und Aschelogistik neu definiert werden kann.
- neue Wärmeträger/Wärmequellen miteinbezogen werden können.
- eine Feuerungstechnologie und Anlagendimensionierung gewählt werden kann, welche einen hohen Jahresnutzungsgrad erreicht, niedrige Kosten für Wartung und Instandsetzung ermöglicht und langfristig über ein grosses Ausbaupotenzial verfügt.

Zusammenlegen mit anderen Anlagen
Es soll ebenfalls geprüft werden, ob bestehende Probleme anstatt durch eine Erneuerung/Neubau nicht auch durch einen Zusammenschluss des bestehenden Wärmenetzes mit einem anderen, sich im näheren Umfeld befindlichen Wärmenetz gelöst werden könnten. Falls die Leistungskapazität der anderen Heizzentrale für ein Zusammenlegen der beiden Wärmenetze nicht ausreicht oder die Ausbaureserven bereits ausgeschöpft sind, kann auch in diesem Fall geprüft werden, ob an einem neuen Standort eine für beide Wärmenetze gemeinsame neue Heizzentrale erstellt werden kann.

Wenn im näheren und weiteren Umfeld der bestehenden Wärmeerzeugung mehrere andere Wärmenetze vorhanden sind, soll geprüft werden, ob ein Zusammenschluss aller Fernwärmenetze denkbar und vorteilhaft ist. Dabei können einzelne Heizzentralen gemeinsam weiterverwendet werden oder an geeigneter Stelle eine neue Heizzentrale erstellt werden.

Contracting

Im Fall von Schwierigkeiten bei der Durchführung einer Anlagenerneuerung kann auch die Einbindung eines Contractors eine Lösungsoption darstellen. Die Praxis hat gezeigt, dass spezialisierte Contractoren oft neue Konzepte, Geschäftsmodelle und langfristige Entwicklungsperspektiven in ein Projekt einbringen und so die Revitalisierung von Altanlagen vorantreiben können.

Zudem betreiben geeignete Contractoren in der Regel bereits mehrere Holzheizwerke und Wärmenetze und verfügen über Erfahrungen bei der Beurteilung und Revitalisierung von Bestandsanlagen. Beispielsweise können durch eine zentrale Verwaltung, ein professionelles Marketing, vorhandenes Betriebspersonal oder bestehende Brennstofflieferketten Synergien genutzt und Kosten eingespart werden.

Anhang

19 Vorschriften

Bei der Erstellung und beim Betrieb eines Holzheizwerkes müssen vielfältige Anforderungen beachtet werden. Es liegt in der Verantwortung des Planers, die lokal geltenden Gesetze, Verordnungen, Normen und Richtlinien sowie weitere zu beachtende Vorschriften zu kennen und anzuwenden. Im Folgenden ist eine Auswahl relevanter Vorschriften für die Schweiz, Deutschland und Österreich dargestellt. Neben nationalen können internationale Vorschriften von Bedeutung sein, beispielsweise International Organization for Standardization (ISO), European Committee for Standardization (CEN). Der Auswahl werden unter anderem die folgenden Themen zugrunde gelegt:

Brennstoffanforderungen

In den Brennstoffanforderungen der aufgeführten Vorschriften wird unter anderem definiert, welche Brennstoffe für welche Feuerungsart zugelassen sind.

Schadstoffemissionen

Begrenzt wird die Emission von Luftschadstoffen wie Staub und Kohlenmonoxid, mitunter auch Stickoxiden und Schwefeldioxid. Üblicherweise sind die Begrenzungen abhängig von der Feuerungswärmeleistung eines Holzheizwerkes und vom verwendeten Brennstoff.

Asche

Gesetzlich geregelt sind unter anderem der Transport der Holzasche, deren eventuelle Verwertung als Dünger und/oder die Beseitigung der (Filter-)Aschen. Bei einer zukünftigen Verwertung der Aschen ist eine getrennte Sammlung der Aschefraktionen notwendig.

Sicherheit (Personenschutz, Unfallverhütung)

Die Verhütung von Unfällen ist generell von Bedeutung. Beispielsweise müssen Holzbrennstofflager gegen Absturz und Verschütten beim Betreten gesichert sein, und die Fördertechnik ist gegen Verletzungen abzusichern. Bei der Lagerung von feuchtem Brennstoff entstehen Gärgase, die sich am Boden von Silo, Hydraulikraum und Heizraum sammeln können; gefährdete Bereiche müssen mit geeigneten Lüftungseinrichtungen ausgerüstet sein, damit für das Personal nie eine Erstickungsgefahr besteht. Vereinzelt schreiben die zuständigen Behörden zusätzlich CO-Warngeräte zum Personenschutz vor. Am Schnitzelsilo sollte ein Hinweis auf mögliche Schimmelbildung angebracht werden und auf die damit verbundene Gesundheitsgefahr hingewiesen werden. Bei der Lagerung von Holzpellets im geschlossenen Raum ist ein Hinweis auf die Gefahr der Bildung von Kohlenmonoxid notwendig. Auch das Umschlagen der Asche kann mit Gefahren verbunden sein, vor denen das Personal durch geeignete Massnahmen zu schützen ist (z. B. Staubschutz).

Hydraulische Sicherheitseinrichtungen

Die Verhinderung eines unzulässigen Temperatur- oder Druckanstiegs im hydraulischen System der Wärmeerzeugung, im Speziellen im Heizkessel, ist durch den Einbau von Sicherheitseinrichtungen zu gewährleisten.

Brandschutz

Brandentstehung und Brandausbreitung im Heizraum und im Brennstofflager müssen durch geeignete Einrichtungen und bauliche Massnahmen verhindert werden. Die notwendigen Fluchtwege sind sicherzustellen.

Lärmschutz

Die Auswirkungen der Schallausbreitung (Luftschall und Körperschall) beim Betrieb eines Holzheizwerkes sind in jedem Fall abzuklären, die regionalen Lärmschutzverordnungen sind einzuhalten. Hauptlärmquellen sind Abgasventilator, Kaminmündung, Siloaustragungs-, Förder- und Transporttechnik sowie gegebenenfalls die Aufbereitung der Hackschnitzelbrennstoffe vor Ort. Lärmemissionen sind durch geeignete Massnahmen zu vermindern.

Blitzschutz

Holzheizwerk, Maschinenpark und Fernwärmenetz müssen mittels Blitz- und Überspannungsschutzeinrichtungen gegen Blitzschlag geschützt werden.

Explosionsschutz

In Gefahrenbereichen mit explosionsgefährdeter Atmosphäre müssen Massnahmen zur Prävention sowohl konstruktiver als auch betrieblicher Art vorgesehen werden.

Vorschriften, Verordnungen, Normen und Richtlinien in der Schweiz

Bei der Realisierung einer Heizungsanlage in der Schweiz müssen zahlreiche gesetzliche Bestimmungen, Verordnungen, Richtlinien und Normen beachtet werden. Im Folgenden ist eine Auswahl der für die Heizungstechnik und für die energetische Holznutzung wichtigen Vorschriften aufgeführt. Ein Anspruch auf Vollständigkeit wird nicht erhoben. Rechtsvorschriften sind stets in der geltenden aktuellen Fassung anzuwenden.

Tabelle 19.1 Vorschriften, Verordnungen, Normen und Richtlinien in der Schweiz (Auswahl).

Thema	Kurztitel	Bezeichnung
Bedarfsermittlung	SIA-Norm 380/1	Grundlagen für energetische Berechnungen von Gebäuden
	SIA-Norm 384/1 /2 /3	Heizungsanlagen in Gebäuden
	SIA-Norm 385/1	Anlagen für Trinkwarmwasser in Gebäuden – Grundlagen und Anforderungen
Vertragliche Regelungen	SIA 108	Ordnung für Leistungen und Honorare der Ingenieurinnen und Ingenieure der Bereiche Gebäudetechnik, Maschinenbau und Elektrotechnik
	SIA 112	Modell Bauplanung
	SIA 118	Allgemeine Bedingungen für Bauarbeiten
Brennstoffanforderungen	LRV	Luftreinhalte-Verordnung
	EN ISO 17225	Biogene Festbrennstoffe (ersetzt EN 14961)
Emissionsanforderungen	LRV	Luftreinhalte-Verordnung
	Cercl'Air	
	Empfehlung Nr. 31p	Vollzugsblätter Emissionsüberwachung Holzfeuerungen über 70 kW_{FWL}
Asche	VVEA	Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen
	VeVA	Verordnung über den Verkehr mit Abfällen
Sicherheit	Suva	Schweizerische Unfallversicherungsanstalt
		Grünschnitzelsilos (Best. Nr. 66050.D)
		Checkliste Grünschnitzelsilos (Best. Nr. 67006.D)
		Checkliste Holzspänesilos (Best. Nr. 67007.D)
		Merkblatt Explosionsschutz (www.suva.ch/2153.d)
		Suva 88813 – Die acht lebenswichtigen Regeln der Instandhaltung
	SWKI	Schweizerischer Verein von Gebäudetechnik-Ingenieuren
		Richtlinie 91-1 Be- und Entlüftung von Heizräumen
		Richtlinie HE301-01 Sicherheitstechnische Einrichtung für Heizungsanlagen (ersetzt Richtlinie 91-1 mit Ergänzungen Nr. 1 und 2)
		BT102-01 Wasserbeschaffenheit für Gebäudetechnik-Anlagen
		Richtlinie HE200-01 Lagerung von Holzpellets beim Endkunden
	SN EN 12779	Sicherheit von Holzbearbeitungsmaschinen – Ortsfeste Absauganlagen für Holzstaub und Späne – Sicherheitstechnische Anforderungen
	DGUV-Information 209-083	Silos für das Lagern von Holzstaub und -spänen – Bauliche Gestaltung, Betrieb
	DGUV-Information 209-045	Absauganlagen und Silos für Holzstaub und -späne; Brand- und Explosionsschutz
		BGI Information 739-2
	DGV	Druckgeräteverordnung DGV (SR 930.114)
	proPellets.ch	Empfehlungen zur Lagerung von Holzpellets 2024
	SN EN ISO 20023:2019	Biogene Festbrennstoffe – Sicherheit von Pellets aus biogenen Festbrennstoffen – Sicherer Umgang und Lagerung von Holzpellets in häuslichen und anderen kleinen Feuerstätten
	SN EN ISO 20024:2020-08	Biogene Festbrennstoffe – Sicherer Umgang und Lagerung von Pellets aus biogenen Festbrennstoffen in kommerziellen und industriellen Anwendungen
Brandschutz	VKF	Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen
		Brandschutzrichtlinie 24-15 Wärmetechnische Anlagen
		104-15 Spänefeuerungen
		105-15 Schnitzelfeuerungen
		106-15 Pelletsfeuerungen
		Abgasanlagen
	Lokale feuerpolizeiliche Vorschriften	
Lärmschutz	LSV	Lärmschutz-Verordnung
	SIA 181	Schallschutz im Hochbau
Kaminquerschnitt **Kaminhöhe**	LRV	Luftreinhalte-Verordnung
	SIA 384/4	Kamine für den Hausbrand
	BAFU	Bundesamt für Umwelt
		UV-1318-D Mindesthöhe von Kaminen über Dach

Vorschriften, Verordnungen, Normen und Richtlinien in Deutschland

Bei der Realisierung einer Heizungsanlage in Deutschland müssen zahlreiche gesetzliche Bestimmungen, Verordnungen, Richtlinien und Normen beachtet werden. Neben deutschem Recht bekommen europäische Rechtsvorschriften und Normen zunehmend Bedeutung. Im Folgenden ist eine Auswahl der für die Heizungstechnik und für die energetische Holznutzung wichtigen Vorschriften aufgeführt. Ein Anspruch auf Vollständigkeit wird nicht erhoben. Rechtsvorschriften sind stets in der geltenden aktuellen Fassung anzuwenden.

Tabelle 19.2 Vorschriften, Verordnungen, Normen und Richtlinien in Deutschland (Auswahl).

Thema	Kurztitel	Bezeichnung
Bedarfsermittlung	GEG	Gebäudeenergiegesetz
	DIN EN 12831	Heizungsanlagen in Gebäuden
	DIN V 18599	Energetische Bewertung von Gebäuden
	DIN EN ISO 52016-1	Energetische Bewertung von Gebäuden
	VDI 2067	Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen
Vertragliche Regelungen	BGB	Bürgerliches Gesetzbuch
	VgV	Vergabeverordnung
	VOB	Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen
	AVBFernwärmeV	Verordnung über allgemeine Bedingungen für die Versorgung mit Fernwärme
	HeizKV	Verordnung über verbrauchsabhängige Abrechnung der Heiz- und Warmwasserkosten
	HOAI	Honorarordnung für Architekten und Ingenieure
Brennstoffanforderungen	BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
	TA Luft	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft
	1. BImSchV	Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen
	4. BImSchV	Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen
	13. BImSchV	Verordnung über Grossfeuerungs-, Gasturbinen- und Verbrennungsmotoranlagen
	44. BImSchV	Verordnung über mittelgrosse Feuerungs-, Gasturbinen- und Verbrennungsmotoranlagen
	DIN EN ISO 17225	Biogene Festbrennstoffe (ersetzt DIN EN 14961)
Emissions- und Immissionsanforderungen	BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
	TA Luft	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft
	1. BImSchV	Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen
	4. BImSchV	Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen
	13. BImSchV	Verordnung über Grossfeuerungs-, Gasturbinen- und Verbrennungsmotoranlagen
	44. BImSchV	Verordnung über mittelgrosse Feuerungs-, Gasturbinen- und Verbrennungsmotoranlagen
	VDI 2066	Messen von Partikeln
	VDI 3462-4	Emissionsminderung
	VDI 3253	Emissionen aus stationären Quellen: Methoden zum qualitativen Nachweis des kontinuierlichen effektiven Betriebs von Staubabscheidern bei Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe mit einer Feuerungswärmeleistung zwischen 1 MW und weniger als 5 MW
	AwSV	Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen
	BBodSchV	Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung
Asche	KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
	DüngG	Düngegesetz
	AVV	Abfallverzeichnis-Verordnung
	BioAbfV	Bioabfallverordnung
	DepV	Deponieverordnung
	DüMV	Düngemittelverordnung
	DüV	Düngeverordnung
	NachwV	Nachweisverordnung

Thema	Kurztitel	Bezeichnung
Sicherheit	UVV	Unfallverhütungsvorschriften
	DGUV	DGUV Vorschriften- und Regelwerk
	MRL	Maschinen-Richtlinie
	DGRL	Druckgeräte-Richtlinie
	Niederspannungs-RL	Niederspannungsrichtlinie
	EMV-RL	Richtlinie über die elektromagnetische Verträglichkeit
	REACH	REACH-Verordnung
	BetrSichV	Betriebssicherheitsverordnung
	DIN EN ISO 12100	Sicherheit von Maschinen
	DIN EN 303-5	Heizkessel – Heizkessel für feste Brennstoffe, manuell und automatisch beschickte Feuerungen, Nennwärmeleistung bis 500 kW – Begriffe, Anforderungen, Prüfungen und Kennzeichnung
	DIN EN 12828	Heizungsanlagen in Gebäuden – Planung von Wasserheizungsanlagen
	DIN EN 61000	Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)
	DIN 4747	Fernwärmeanlagen
	VDI 2694	Bunker und Silos
	VDI 2035	Verhütung von Schäden durch Korrosion und Steinbildung in Warmwasserheizungsanlagen
	VDI 3464	Lagerung von Holzpellets beim Verbraucher – Anforderungen an Lager sowie Herstellung und Anlieferung der Pellets unter Gesundheits- und Sicherheitsaspekten
	AGFW-FW	AGFW-Regelwerk
	DEPV	Lagerraumbroschüre zur Lagerung von Holzpellets
Brand- und Explosionsschutz	MBO	Musterbauordnung
	FeuV	Feuerungsverordnung
	VVB	Verordnung über die Verhütung von Bränden
	ATEX	ATEX-Herstellerrichtlinie, ATEX-Betriebsrichtlinie
	ISO 8421	Brandschutz, Begriffe
	DIN EN 1127	Explosionsfähige Atmosphären – Explosionsschutz
	DIN 4102	Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen
	VDI 2263	Staubbrände und Staubexplosionen
Lärmschutz	BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
	TA Lärm	Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm
	AGFW-FW	AGFW-Regelwerk
Kamin	TA Luft	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft
	DIN EN 13084	Freistehende Schornsteine
	DIN EN 13384	Abgasanlagen – Wärme- und strömungstechnische Berechnungsverfahren
	DIN 1298	Abgasanlagen – Verbindungsstücke für Feuerungsanlagen
	DIN 18160	Abgasanlagen
	VDI 3781-4	Ableitbedingungen für Abgase
Blitzschutz	DIN EN 61643	Überspannungsschutzgeräte für Niederspannung

Vorschriften, Verordnungen, Normen und Richtlinien in Österreich

Bei der Realisierung einer Heizungsanlage in Österreich müssen zahlreiche gesetzliche Bestimmungen, Verordnungen, Richtlinien und Normen beachtet werden. Im Folgenden ist eine Auswahl der für die Heizungstechnik und für die energetische Holznutzung wichtigsten Vorschriften in Österreich aufgeführt. Ein Anspruch auf Vollständigkeit wird nicht erhoben.

Rechtsvorschriften sind stets in der geltenden aktuellen Fassung anzuwenden. Österreichische Gesetze und Verordnungen können kostenlos unter http://www.ris.bka.gv.at abgefragt werden. Die national gültigen Normen und Richtlinien werden unter anderem von folgenden Stellen herausgegeben:

- Österreichisches Normungsinstitut (Austrian Standards) – http://www.austrian-standards.at
- Österreichischer Verband für Elektrotechnik (ÖVE) – http://www.ove.at
- Österreichisches Kuratorium für Landtechnik und Landentwicklung (ÖKL) – http://www.oekl.at
- Österreichischer Arbeitsring für Lärmbekämpfung (ÖAL) – http://www.oal.at
- Prüfstelle für Brandschutztechnik – http://www.pruefstelle.at
- Allgemeine Unfallversicherungsanstalt (AUVA) – http://www.auva.at

Tabelle 19.3 Vorschriften, Verordnungen, Normen und Richtlinien in Österreich (Auswahl).

Thema	Kurztitel	Bezeichnung
Anlagenbetrieb	GewO	Gewerbeordnung
	NSG	Naturschutzgesetze der Länder
Bedarfsermittlung	ÖNORM EN ISO 52016	Energetische Bewertung von Gebäuden
und Konzeption	ÖNORM EN 12828	Heizungsanlagen in Gebäuden – Planung von Warmwasser-Heizungsanlagen
	ÖNORM H 5151-1	Planung von zentralen Warmwasser-Heizungsanlagen mit oder ohne Warmwasserbereitung – Teil 1: Gebäude mit einem spezifischen Transmissionsleitwert über 0,5 W/(K.m²) – Ergänzungsnorm zu ÖNORM EN 12828
	ÖNORM EN 12831-1	Heizungsanlagen in Gebäuden – Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast
	ÖNORM H 7500-1	Heizungssysteme in Gebäuden – Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast für Gebäude mit einem mittleren U-Wert ≥ 0,5 W/(m2 · K) – Nationale Ergänzung zu ÖNORM EN 12831-1
	ÖNORM H 7500-3	Heizungssysteme in Gebäuden – Teil 3: Vereinfachtes Verfahren zur Berechnung der Norm-Gebäudeheizlast
	ÖNORM H 5142	Haustechnische Anlagen – Hydraulische Schaltungen für Warmwasser-Heizungsanlagen, Kühlsysteme und solarthermische Anlagen
	ÖNORM B 2503	Kanalanlagen – Ergänzende Richtlinien
	ÖNORM B 2506	Regenwasser-Sickeranlagen
	ÖNORM H 5050	Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden
	OIB-RL 6/2019	Energieeinsparung und Wärmeschutz
	ÖNORM M 7140	Betriebswirtschaftliche Vergleichsrechnung für Energiesysteme nach dynamischen Rechenmethoden
	ÖKL-Merkblatt 67	Planung von Biomasseheizwerken und Nahwärmenetzen
	VDI 2067	Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen
Vertragliche Regelungen	BVergG	Bundesvergabegesetz
	HeizKG	Heizkostenabrechnungsgesetz
	ÖNORM A 2050	Vergabe von Aufträgen über Leistungen – Ausschreibung, Angebot und Zuschlag – Verfahrensnorm
	ÖNORM A 2060	Allgemeine Vertragsbestimmungen für Leistungen – Vertragsnorm

Thema	Kurztitel	Bezeichnung
Brennstoffanforderungen	ÖNORM EN ISO 17225	Biogene Festbrennstoffe
	ÖNORM C4005	Holzhackgut und Schredderholz für die energetische Verwertung in Anlagen mit einer Nenn-Wärmeleistung über 500 kW – Anforderungen und Prüfbestimmungen – Nationale Ergänzung zu ÖNORM EN ISO 17225-1
	ÖNORM M 7132	Energiewirtschaftliche Nutzung von Holz und Rinde als Brennstoff – Begriffsbestimmungen und Merkmale
	ÖNORM S2100	Abfallverzeichnis
Emissions- und Immissionsanforderungen	FAV	Feuerungsanlagenverordnung
	AWG	Abfallwirtschaftsgesetz u. Abfallwirtschaftskonzept (AWK)
	IG-L	Immissionsschutzgesetz – Luft
	WRG	Wasserrechtsgesetz
	AAEV	Allgemeine Abwasseremissionsverordnung
	IEV	Indirekteinleiterverordnung
	RL 2000/76/EG	Richtlinie über die Verbrennung von Abfällen
Asche	AWG	Abfallwirtschaftsgesetz
	KPV	Kompostverordnung
	AVV	Abfallverzeichnisverordnung
	AbfallbilanzV	Abfallbilanzverordnung
	ALSAG	Altlastensanierungsgesetz
	DMG	Düngemittelgesetz
	ForstG	Forstgesetz
	WRG	Wasserrechtsgesetz
		Ascherichtlinien der Länder
Lärmschutz	ÖNORM B 8115	Schallschutz und Raumakustik im Hochbau
		ÖAL-Richtlinien Richtlinien des Österreichischen Arbeitsrings für Lärmbekämpfung
Sicherheit	ASchG	ArbeitnehmerInnenschutzgesetz
	BauKG	Bauarbeitenkoordinationsgesetz
	ETG	Elektrotechnikgesetz
	AAV	Allgemeine Arbeitnehmerschutzverordnung
	AStV	Arbeitsstättenverordnung
	BauV	Bauarbeiterschutzverordnung
	DDGV	Duale Druckgeräteverordnung
	ETV	Elektrotechnikverordnung
	ESV	Elektroschutzverordnung
	ÖNORM EN 303-5	Heizkessel – Heizkessel für feste Brennstoffe, manuell und automatisch beschickte Feuerungen, Nennwärmeleistung bis 500 kW – Begriffe, Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung
	ÖNORM M 7510-4	Überprüfung von Heizungsanlagen – Einfache Überprüfung von Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe
	ÖVE E 8120	Verlegung von Energie-, Steuer- und Messkabeln
	ÖVE/ÖNORM E 8200-627	Vieladrige und vielpaarige Kabel für die Verlegung in Luft und in Erde
	ÖNORM B 2533	Koordinierung unterirdischer Einbauten – Planungsrichtlinien (Verlegeabstände Rohrleitungen im Erdreich)
	ÖVE EN 50110	Betrieb von elektrischen Anlagen
	DIN EN 61000	Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)
	AUVA-Merkblätter	Sicherheitsinformationen der Allgemeinen Unfallversicherungsanstalt
	ÖNORM EN ISO 20023	Biogene Festbrennstoffe – Sicherheit von Pellets aus biogenen Festbrennstoffen – Sicherer Umgang und Lagerung von Holzpellets in häuslichen und anderen kleinen Feuerstätten
	ENplus® GD AT 3001:2024	ENplus® Leitfaden Lagerung von Holzpellets
	ÖNORM H5195-1	Wärmeträger für haustechnische Anlagen – Teil 1: Verhütung von Schäden durch Korrosion und Steinbildung in geschlossenen Warmwasser-Heizungsanlagen

Thema	Kurztitel	Bezeichnung
Thema	**Kurztitel**	**Bezeichnung**
Brandschutz	ÖNORM EN 1366	Feuerwiderstandsprüfung für Installationen
	ÖNORM B 3800	Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen
	ÖNORM F 1000	Feuerwehrtechnik und Brandschutzwesen
	ÖNORM H 5170	Heizungsanlagen – Anforderungen an die Bau- und Sicherheitstechnik sowie an den Brand- und Umweltschutz
	TRVB H118	Automatische Holzfeuerungen
	TRVB	Technische Richtlinien vorbeugender Brandschutz
Blitzschutz	ÖVE E 40/1987	Schutz von Erdern und erdverlegten Metallteilen gegen Korrosion
	ÖVE/ÖNORM E 8049	Blitzschutz baulicher Anlagen
Explosionsschutz	ExSV 2015	Explosionsschutzverordnung
	ElExV 1993	Elektro-Ex-Verordnung
Kamin	ÖNORM M 9440	Ausbreitung von luftverunreinigenden Stoffen in der Atmosphäre – Berechnung von Immissionskonzentrationen
	DIN EN 13384	Abgasanlagen – Wärme- und strömungstechnische Berechnungsverfahren

20 Wichtige Berechnungen und Umrechnungen

20.1 Luftüberschusszahl Lambda

Die Luftüberschusszahl Lambda (λ) beschreibt das Verhältnis zwischen zugeführter und stöchiometrischer (= theoretisch minimal notwendiger) Verbrennungsluftmenge:

$$\lambda = \frac{\text{zugeführte Verbrennungsluftmenge}}{\text{stöchiometrische Verbrennungsluftmenge}} \quad [-]$$

Die Luftüberschusszahl beeinflusst die Verbrennungsqualität und die Verbrennungstemperatur. Sie kann aus der Abgaszusammensetzung berechnet werden [60]. Nach dem vereinfachten Verfahren können folgende Formeln zur Berechnung von Lambda hergeleitet werden:

$$\lambda = \frac{21}{21 - O_2 + 0.4 * CO} \quad [-]$$

oder

$$\lambda = \frac{20.4}{CO_2 + CO} \quad [-]$$

und

$$O_2 = 21 - CO_2 - 0.6 * CO \quad [-]$$

mit:	CO_2	=	Kohlendioxidkonzentration im trockenen Abgas	[Vol.-%]
	CO	=	Kohlenmonoxidkonzentration im trockenen Abgas	[Vol.-%]
	O_2	=	Sauerstoffkonzentration im trockenen Abgas	[Vol.-%]
	20.4	=	$CO_{2\,max}$ (= maximal möglicher CO_2-Gehalt im Abgas)	[Vol.-%]
	21	=	Sauerstoffkonzentration der Luft	[Vol.-%]

Beispiel:

Messgrössen: O_2 = 9,0 Vol.-%

CO = 250 ppm = 0,025 Vol.-%

Berechnung: $\lambda = \frac{21}{21 - 9 - 0.4 * 0.025} = 1.75 \quad [-]$

Beurteilung: Die Luftüberschusszahl Lambda (λ) soll einerseits möglichst tief sein (hoher feuerungstechnischer Wirkungsgrad), andererseits darf sie nicht zu tief sein, weil sich bei ungenügender Verbrennungsluftmenge die Verbrennungsqualität drastisch verschlechtert und die Verbrennungstemperatur in einen kritischen Bereich (Verschlackungsgefahr) ansteigt.

Die Luftüberschusszahl beträgt bei Holzfeuerungen typischerweise λ ≈ 1.6 – 2.2.

Anmerkung: Die sogenannten «Lambda-Sonden» messen den Sauerstoffgehalt bzw. die Luftüberschusszahl im feuchten Abgas. Die Umrechnung auf trockenes Abgas ist im Kapitel 20.5 zu finden.

20.2 Umrechnung von ppm auf mg/m³

Emissionsmessgeräte für CO, HC und NO_x geben die Messwerte in der Regel in **Vol.-%** oder in **ppm** an. Die Einheit ppm (ppm = **p**arts **p**er **m**illion = 1 : 1'000'000 = ein Millionstel) entspricht wie das Vol.-% dem *Volumenanteil* eines Gases und ist somit unabhängig von Gastemperatur und -druck. Die Umrechnung von Vol.-% auf ppm kann gemäss Tabelle 20.1 vorgenommen werden.

Tabelle 20.1 Umrechnung von Vol.-% auf ppm

Vol.-%	ppm
100	1'000'000
10	100'000
1	10'000
0.1	1'000
0.01	100
0.001	10
0.0001	1

Die Emissionsgrenzwerte werden in der Regel nicht in Volumeneinheiten angegeben, sondern in mg/m³. Die Umrechnung von **ppm** auf **mg/m³** erfolgt durch Multiplikation mit der **Dichte** der jeweiligen Gaskomponente. Da die Werte bei Normbedingungen (Temperatur = 0 °C, Druck = 1013 mbar) anzugeben sind, erfolgt die Umrechnung mit der Normdichte (Molmasse / Normvolumen), also der Dichte bei Normbedingungen.

Emissionswert [mg/m³]	=	Normdichte in kg/m³	*	Emissionswert in ppm
CO [mg/m³]	=	**1,25** kg/m³	*	CO [ppm]
NO_x [mg/m³]	=	**2,05** kg/m³	*	NO_x [ppm] (NO_x angegeben als NO_2 ≈ 2.05 kg/m³)
HC* [mg/m³]	=	**0,54** kg/m³	*	HC [ppm] (für CH_4 als Kalibriergas ≈ 0.54 kg/m³)
HC* [mg/m³]	=	**1,62** kg/m³	*	HC [ppm] (für C_3H_8 als Kalibriergas ≈ 1.62 kg/m³)

* Gasförmige organische Stoffe, angegeben als Gesamtkohlenstoff (C)

Beispiel: Umrechnung der CO-Konzentration (ohne Umrechnung auf Bezugssauerstoffgehalt)

Messwert:	CO	=	200 ppm					
Berechnung:	**CO** [mg/m³]	=	1,25 kg/m³	* CO [ppm]	=	1,25 kg/m³ * 200 ppm	=	**250 mg/m³**

20.3 Sauerstoffbezugsgrösse

Für den Vergleich von Emissionen verschiedener Feuerungen oder verschiedener Versuche am selben Aggregat wird eine Bezugsgrösse benötigt. Ohne Umrechnung der Emissionswerte auf eine Bezugsgrösse ist kein Vergleich mit anderen Daten möglich. Als Bezugsgrösse ist der Sauerstoffgehalt O_2 im trockenen Abgas vorgeschrieben. Der Bezugssauerstoffgehalt ist länderspezifisch und hängt von der Anlagegrösse ab. In der Luftreinhalte-Verordnung LRV gilt bis zu einer Feuerungswärmeleistung von 1 MW ein Bezugssauerstoffgehalt von 13 %, darüber gilt 11 %. In der europäischen Norm EN 303-5 für Holzfeuerungen gilt bis zu einer Nennwärmeleistung von 500 kW ein Bezugssauerstoffgehalt von 10 %. In der 44. BImSchV gilt für mittelgrosse Holzfeuerungen mit einer Feuerungswärmeleistung über 1 MW ein Bezugssauerstoffgehalt von 6 %.

Tabelle 20.2 Umrechnung von Vol.-% $O_{2\ Bezug}$ auf λ_{Bezug}

Vol.-% $O_{2\ Bezug}$	λ_{Bezug}
13	2.625
11	2.100
10	1.910
6	1.400

Emissionsmesswerte müssen auf die vorgeschriebene Bezugsgrösse umgerechnet werden, also auf Normbedingungen und auf den Bezugssauerstoffgehalt. Damit wird verhindert, dass durch Verdünnung der Abgase mit Falschluft (z. B. am Kamineintritt vor der Probenahme für die Emissionsmessung) tiefere Emissionswerte ermittelt werden. Durch die Umrechnung werden die Messwerte auf eine vorgegebene Verdünnung gemäss dem entsprechenden Bezugssauerstoffgehalt umgerechnet. Die Umrechnung erfolgt nach folgendem Schema:

$$\text{Emissionswert}\left[\frac{mg}{m^3}\right]\text{ bei Bezugssauerstoffgehalt} = \text{Emissionswert}\,[ppm]\ *\ \text{Normdichte}\left[\frac{kg}{m^3}\right]\ *\ \frac{21 - O_{2\ Bezug}\ [\%]}{21 - O_{2\ Gemessen}\ [\%]}$$

Dies ist gleichbedeutend mit einer Umrechnung vom gemessenen λ auf das λ der Bezugsgrösse. Die Berechnung von λ kann durch die Messung von O_2 oder CO_2 erfolgen. Zur Berechnung von λ_{Bezug} wird der entsprechende Sauerstoffgehalt der Bezugsgrösse $O_{2\ Bezug}$ verwendet.

$$\text{Emissionswert}\left[\frac{mg}{m^3}\right]\text{ bei Bezugssauerstoffgehalt} = \text{Emissionswert}\,[ppm]\ *\ \text{Normdichte}\left[\frac{kg}{m^3}\right]\ *\ \frac{\lambda_{Gemessen}}{\lambda_{Bezug}}$$

Beispiel: Berechnung der CO-Konzentration bei Bezugssauerstoffgehalt

Messgrössen: CO = 200 ppm

O_2 = 9.0 Vol.-% (λ = 1.75)

Bezugsgrösse: O_{2Bezug} = 13 Vol.-% (λ_{Bezug} = 2.625)

Berechnung:

$$CO - \text{Emissionswert} = 200\ ppm\ *\ 1.25\frac{kg}{m^3}\ *\ \frac{21\% - 13\%}{21\% - 9\%} = 167\ \frac{mg}{m^3}\ \text{bei}\ 13\%\ O_2$$

oder

$$CO - \text{Emissionswert} = 200\ ppm\ *\ 1.25\frac{kg}{m^3}\ *\ \frac{1.75}{2.625} = 167\ \frac{mg}{m^3}\ \text{bei}\ 13\%\ O_2$$

Umrechnung auf einen anderen Bezugssauerstoffgehalt

Je nach gesetzlichen Anforderungen und Leistungsklassen gelten unterschiedliche Emissionsgrenzwerte mit unterschiedlichen Bezugssauerstoffgehalten. Mit Hilfe von Tabelle 20.3 lassen sich Emissionswerte, angegeben in mg/m^3 bezogen auf einen bestimmten Bezugssauerstoffgehalt, auf einen anderen üblichen Bezugssauerstoffgehalt umrechnen.

Tabelle 20.3 Umrechnen eines Emissionswertes auf einen anderen Bezugssauerstoffgehalt.

Bezugssauerstoffgehalt in Vol.-%	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
0																	
1																	
2																	
3																	
4																	
5																	
6	140.0	133.3	126.7	120.0	113.3	106.7	100	93.3	86.7	80.0	**73.3**	**66.7**	60.0	**53.3**	46.7	40.0	33.3
7																	
8																	
9																	
10	190.9	181.8	172.7	163.6	154.5	145.5	**136.4**	127.3	118.2	109.1	100	**90.9**	81.8	**72.7**	63.6	54.5	45.5
11	210.0	200.0	190.0	180.0	170.0	160.0	**150.0**	140.0	130.0	120.0	**110.0**	100	90.0	**80.0**	70.0	60.0	50.0
12																	
13	262.5	250.0	237.5	225.0	212.5	200.0	**187.5**	175.0	162.5	150.0	**137.5**	**125.0**	112.5	100	87.5	75.0	62.5
14																	
15																	
16																	

Lesebeispiel: 100 mg/m3 bei einem Bezugssauerstoffgehalt von 10 Vol.-% entsprechen 90.9 mg/m3 bei 11 Vol.-% O2 und 136.4 mg/m3 bei 6 Vol.-% O2

Beispiel: Umrechnung des CO-Emissionswertes angegeben bei einem Bezugssauerstoffgehalt von 11 Vol.-% auf einen Bezugssauerstoffgehalt von 6 Vol.-%

Ausgangsgrösse: CO-Emissionswert = 180 mg/m^3 bezogen auf 11 Vol.-% O_2

Gemäss Tabelle 20.3 folgt

CO-Emissionswert = 100 mg/m^3 bezogen auf 11 Vol.-% O_2 entspricht

CO-Emissionswert = 150 mg/m^3 bezogen auf 6 Vol.-% O_2

Der CO-Emissionswert umgerechnet auf 6 Vol.-% O_2 beträgt somit:

$$\text{Emissionswert Neu} = \text{Emissionswert Ausgangsgrösse} * \frac{\text{Emissionswert Tabelle 20.3 Neu}}{\text{Emissionswert Tabelle 20.3 Ausgangsgrösse}}$$

$$= 180 \frac{mg}{m^3} * \frac{150 \frac{mg}{m^3}}{100 \frac{mg}{m^3}} = 270 \frac{mg}{m^3} \text{ bei 6 Vol.-\%} O_2$$

20.4 Umrechnung von mg/m³ auf mg/MJ

Für den Vergleich von Emissionsfrachten verschiedener Brennstoffe, z. B. Öl und Holz, werden Emissionen auf die *erzeugte Energiemenge* [mg/MJ_{Nutz} oder mg/kWh_{Nutz}] bezogen. Der Quotient von Emission und Energiemenge wird auch Emissionsfaktor genannt. Es ist zu beachten, dass als Bezugsgrösse auch die zugeführte Energiemenge [mg/MJ_{End}] verwendet wird. Die beiden Kenngrössen sind über den Wirkungsgrad bzw. den Jahresnutzungsgrad miteinander verknüpft.

Die Angabe von Emissionen in mg/MJ ist in zahlreichen Ländern geläufig, sodass für den internationalen Vergleich von Messwerten eine Umrechnung von mg/m³ auf mg/MJ notwendig ist.

Bei der Umrechnung von mg/m³ auf mg/MJ ist zu beachten, dass die zugeführte Energiemenge bei einer Holzfeuerung vom Heizwert und damit auch vom Wassergehalt abhängig ist. Dies hat zur Folge, dass eine korrekte Umrechnung nur bei Kenntnis des Heizwertes und des Wassergehalts möglich ist. Die Umrechnung auf die zugeführte Brennstoffenergie oder Nutzwärme kann dann wie folgt durchgeführt werden:

$$\text{Emissionswert}\left[\frac{mg}{MJ_{End}}\right] = \text{Emissionswert}\left[\frac{mg}{m^3}\right] \text{ bei } O_{2\,Bezug} * \frac{\lambda_{Bezug} * V_{L\,min}}{18.3 - 2.442 * \frac{M}{100 - M}}$$

$$\text{Emissionswert}\left[\frac{mg}{MJ_{Nutz}}\right] = \frac{\text{Emissionswert}\left[\frac{mg}{MJ_{End}}\right] * 100\,\%}{\eta_a}$$

mit:	λ_{Bezug}	=	Luftüberschusszahl bei $O_{2\,Bezug}$	[–]
	V_{Lmin}	=	stöchiometrische Verbrennungsluftmenge = 4.58	[m³/kg]
	M	=	Wassergehalt	[m.-%]
	η_a	=	Jahresnutzungsgrad	[%]

Beispiel: Umrechnung der CO-Konzentration von mg/m³ bei Bezugssauerstoffgehalt auf mg/MJ

Ausgangsgrösse:
- CO = 100 mg/m³ bei 11 Vol.-%
- M = 25 m.-%
- λ_{Bezug} = 2.1
- η_a = 85 %

$$\text{Emissionswert CO}\left[\frac{mg}{MJ_{End}}\right] = 100 * \frac{2.1 * 4.58}{18.3 - 2.442 * \frac{25}{100 - 25}} = 55\,\frac{mg}{MJ_{End}}$$

$$\text{Emissionswert CO}\left[\frac{mg}{MJ_{Nutz}}\right] = \frac{55\,\frac{mg}{MJ_{End}} * 100\,\%}{85\,\%} = 65\,\frac{mg}{MJ_{Nutz}}$$

20.5 Umrechnung von feuchtem auf trockenes Abgas

Bei einigen Emissionsmessgeräten, z. B. Kohlenwasserstoff-Messgeräten basierend auf Flammenionisationsdetektion (FID) oder NO_x-Messgeräten basierend auf Chemilumineszenzdetektion (CLD), erfolgt die Messung im heissen, feuchten Abgas, weil bei der üblichen Abkühlung des Abgases vor dem Emissionsmessgerät in einem Gaskühler auf ca. 5 °C ein Teil der zu messenden Stoffe ins flüssige Kondensat übergeht und deshalb den Messwert im Messgerät verfälscht. Da die Emissionsgrenzwerte für trockenes Abgas bei Normbedingungen (0 °C, 1013 mbar) gelten, muss bei Messung im feuchten Abgas eine Umrechnung auf trockenes Abgas durchgeführt werden, da der Wasserdampf sonst zu einer Verdünnung der Emissionen führt. Bei Geschwindigkeitsmessungen im heissen, feuchten Abgas muss neben der Feuchtekorrektur auch eine Temperatur- und Druckkompensation erfolgen.

Der Umrechnungsfaktor f kann mit Kenntnis der Luftüberschusszahl λ (im trockenen Abgas) und des Wassergehalts M gemäss folgender Gleichung [54] berechnet werden:

$$\text{Umrechnungsfaktor f} = \frac{\text{Volumenstrom feuchtes Abgas}}{\text{Volumenstrom trockenes Abgas}}$$

$$\text{Umrechnungsfaktor f} = 1 + \frac{0.287}{\lambda} * \left(\frac{M}{100 - M} + 0.512 \right)$$

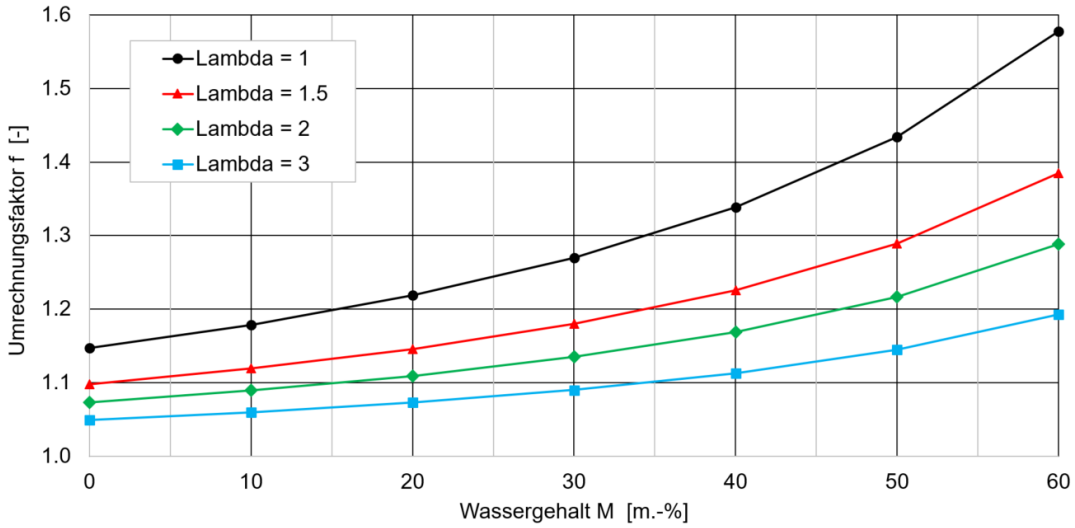


Bild 20.1 Umrechnungsfaktor f in Funktion des Wassergehalts M.

Beispiel: Umrechnung der Kohlenwasserstoff-Konzentration von feuchtem Abgas auf trockenes Abgas

Messwerte:	Kohlenwasserstoffkonzentration im feuchten Abgas HC_f	=	100 ppm
	Wassergehalt M	=	35 m.-%
	Sauerstoff (O_2)	=	7,0 Vol.-% (λ = 1.5)
Bezugssauerstoffgehalt O_{2Bezug}		=	11 Vol.-% (λ_{Bezug} = 2.1)
Umrechnungsfaktor f aus Bild 20.1		=	1.2
Kalibriergas Propan (C_3H_8) Normdichte		=	1.62 kg/m³

Berechnung:

$$\text{Kohlenwasserstoffgehalt} = \text{Kohlenwasserstoffkonzentration feucht } HC_f * \text{Umrechnungsfaktor f} * \text{Normdichte} * \frac{\lambda}{\lambda_{Bezug}}$$

$$= 100 \text{ ppm} * 1.2 * 1.62 \frac{kg}{m^3} * \frac{1.5}{2.1} = 139 \frac{mg}{m^3} \text{ bei } 11\% O_2$$

Anmerkung: Bei vielen handelsüblichen Messgeräten basierend auf IR- und UV-Detektion für CO, NO_x, CO_2 sowie basierend auf Paramagnetismus für O_2 erfolgt die Messung im trockenen Abgas, die Umrechnung von feuchtem auf trockenes Abgas entfällt in diesem Fall.

20.6 Bestimmung der Nennwärmeleistung

Die Nennwärmeleistung ist die von einer Feuerungsanlage an das Kesselwasser abgegebene Wärmeleistung bei Nennleistungsbetrieb der Feuerung. Sie kann direkt mittels Wärmezähler gemessen werden:

$$\dot{Q}_N = (T_{VL} - T_{RL}) * c_{pW} * \dot{m}_W$$

Die Nennwärmeleistung kann auch über den Kesselwirkungsgrad, den Heizwert und den verfeuerten Brennstoffmassenstrom bestimmt werden:

$$\dot{Q}_N = \eta_k * H_U * \dot{m}_B$$

Wenn der verfeuerte Brennstoffmassenstrom nicht bekannt ist, kann er indirekt bestimmt werden durch die Messung des Luftüberschusses und des Volumenstromes der Verbrennungsluft bzw. der trockenen Abgase.

$$\dot{m}_B = \frac{\dot{V}_{AGtr} * \left(1 + \frac{M}{100 - M}\right)}{\lambda * V_{Lmin}}$$

Daraus folgt:

$$\dot{Q}_N = \eta_k * H_U * \frac{\dot{V}_{AGtr} * \left(1 + \frac{M}{100 - M}\right)}{\lambda * V_{Lmin}}$$

mit:	$\dot{Q}_N$	=	Nennwärmeleistung	[kW]
	T_{VL}	=	Vorlauftemperatur	[°C]
	T_{RL}	=	Rücklauftemperatur	[°C]
	c_{pw}	=	Spezifische Wärmekapazität von Wasser = 4.182	[kJ/kg K]
	$\dot{m}_W$	=	Massenstrom (Kessel-)Wasser	[kg/s]
	η_k	=	Kesselwirkungsgrad	[–]
	H_u	=	Heizwert	[kJ/kg]
	$\dot{m}_B$	=	Massenstrom des feuchten Brennstoffs	[kg/s]
	$\dot{V}_{AGtr}$	=	trockener Abgasvolumenstrom	[m^3/s]
	M	=	Wassergehalt	[m.-%]
	λ	=	Luftüberschusszahl	[–]
	V_{Lmin}	=	Stöchiometrisches Verbrennungsluftvolumen = 4.58	[m^3/kg_{atro}]

Der trockene Abgasvolumenstrom kann nicht direkt gemessen werden. Die Geschwindigkeitsmessung z. B. mittels Staurohr und unter Kenntnis der Abgaszusammensetzung liefert den feuchten Abgasvolumenstrom. Die Umrechnung auf trockenes Abgas erfordert die Kenntnis der Abgasfeuchte, die entweder im Abgas bestimmt oder über die Holzfeuchtigkeit ermittelt wird.

20.7 Bestimmung des Brennstoffmassenstroms

Der Massenstrom des feuchten Brennstoffs in Kilogramm pro Stunde ist gegeben durch die Nennwärmeleistung einer Feuerungsanlage, den Kesselwirkungsgrad η_k und den Heizwert H_u:

$$\dot{m}_B = \frac{\dot{Q}_N}{\eta_k * H_u} = \frac{3600}{1000} * \frac{\dot{Q}_N}{\eta_k} * \frac{1 + \frac{M}{100 - M}}{18.3 - 2.442 \frac{M}{100 - M}}$$

mit:	$\dot{m}_B$	=	Massenstrom des feuchten Brennstoffs	[kg/h]
	$\dot{Q}_N$	=	Nennwärmeleistung	[kW]
	η_k	=	Kesselwirkungsgrad	[–]
	H_u	=	Heizwert	[MJ/kg]
	M	=	Wassergehalt	[m.-%]

Der zur Erzeugung einer gewünschten Nennwärmeleistung notwendige Brennstoffmassenstrom hängt wesentlich vom Wassergehalt bzw. vom Heizwert des Brennstoffes ab.

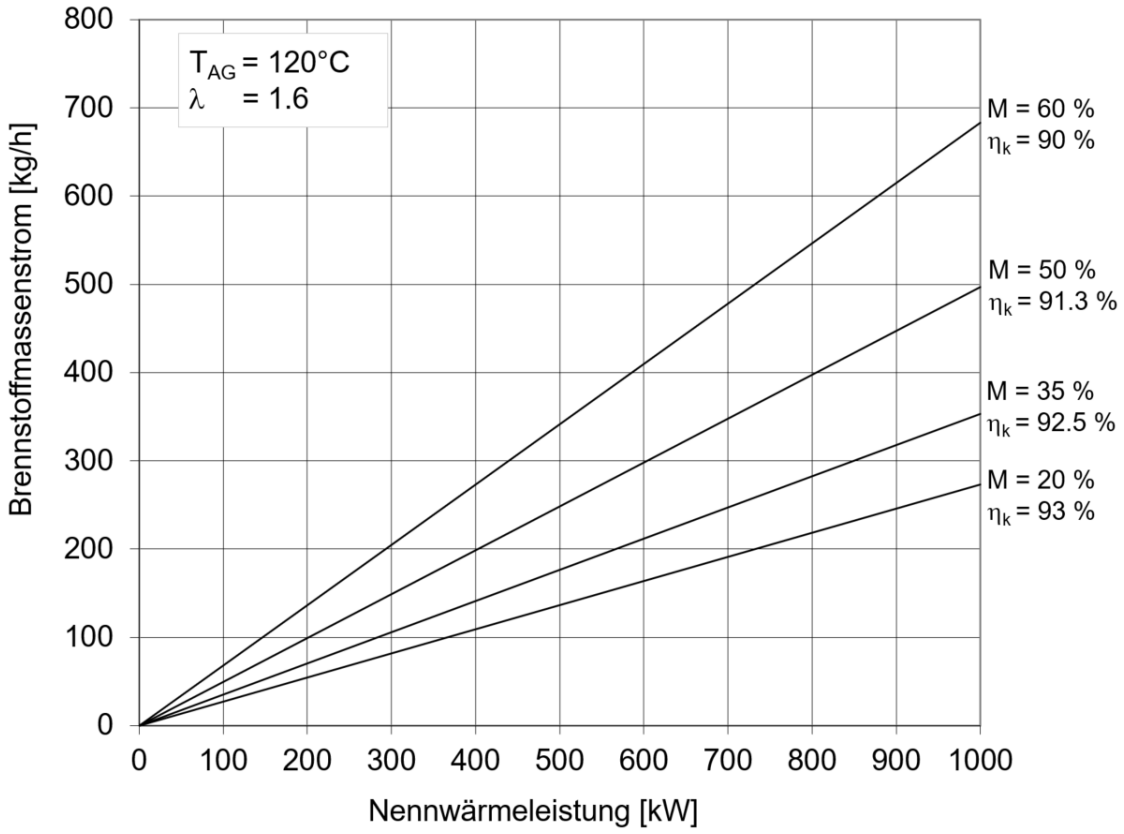


Bild 20.2 Brennstoffmassenstrom in Funktion der Nennwärmeleistung

20.8 Bestimmung der Verbrennungsluftmenge

Die Verbrennungsluftmenge, d. h. der Volumenstrom der Verbrennungsluft, entspricht etwa dem Volumenstrom des trockenen Abgases:

$$\dot{V}_L \approx \dot{V}_{AGtr}$$

Daraus folgt gemäss Kap. 20.6:

$$\dot{V}_L = \frac{\dot{Q}_N * 100\%}{\eta_k} * \frac{\lambda * V_{Lmin}}{18.3 - 2.442 \frac{M}{100 - M}} * \frac{3600}{1000}$$

mit:	$\dot{V}_L$	=	Verbrennungsluftmenge	[m^3/h]
	$\dot{V}_{AGtr}$	=	trockener Abgasvolumenstrom	[m^3/h]
	$\dot{Q}_N$	=	Nennwärmeleistung	[kW]
	η_k	=	Kesselwirkungsgrad	[%]
	M	=	Wassergehalt	[m.-%]
	λ	=	Luftüberschusszahl	[–]
	V_{Lmin}	=	Stöchiometrisches Verbrennungsluftvolumen = 4.58	[m^3/kg_{atro}]

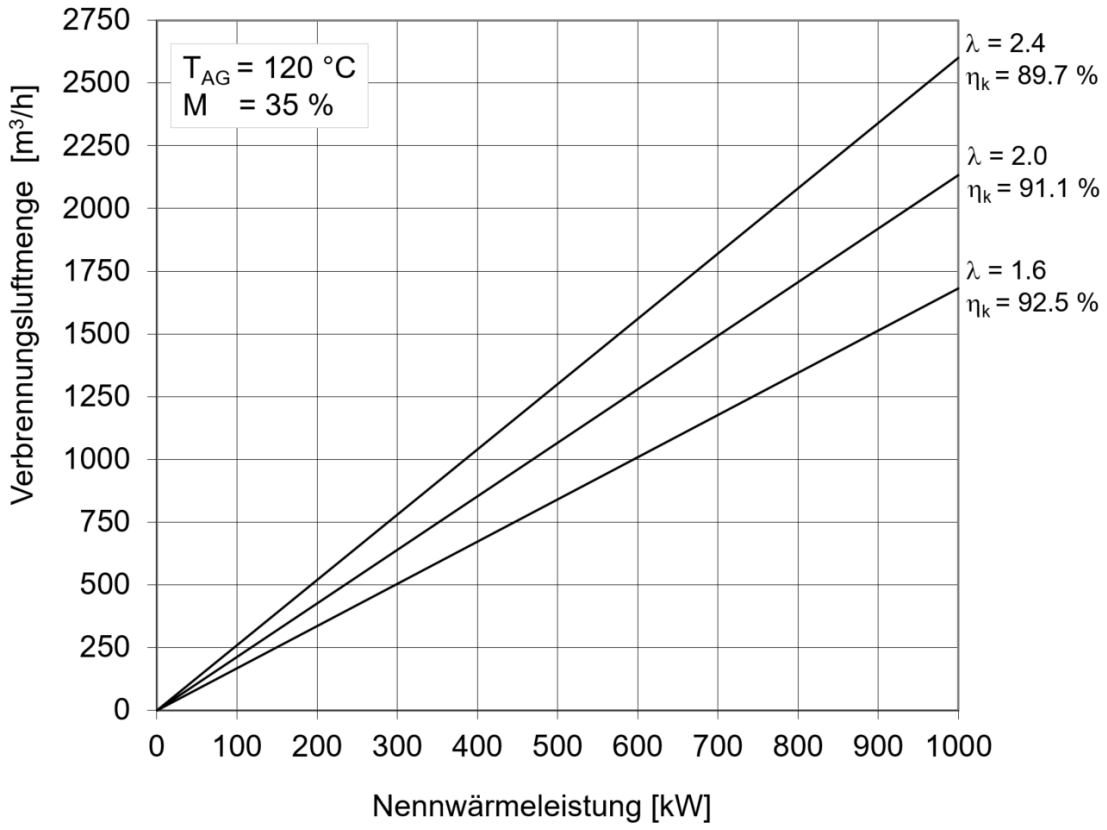


Bild 20.3 Verbrennungsluftmenge in Funktion von Nennwärmeleistung und Luftüberschusszahl

Die zur Erzeugung einer gewünschten Nennwärmeleistung notwendige Verbrennungsluftmenge hängt etwa gleich stark von der Luftüberschusszahl und vom Heizwert bzw. vom Wassergehalt ab.

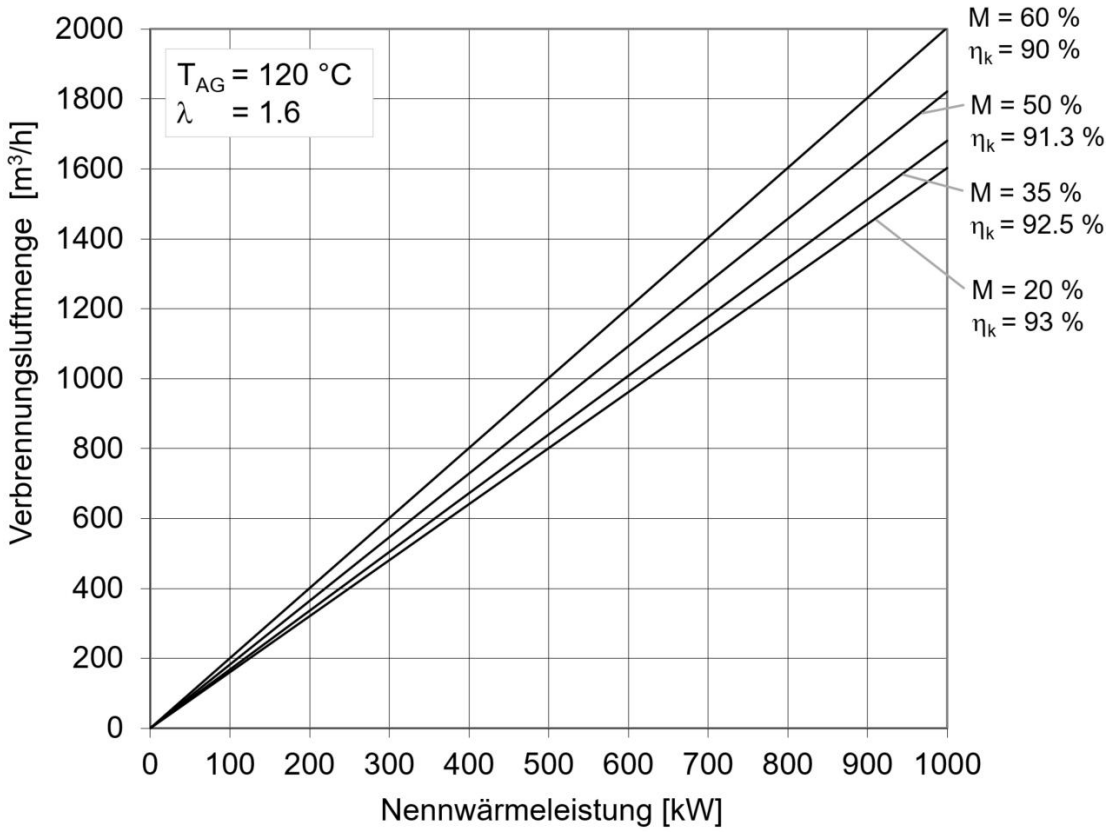


Bild 20.4 Verbrennungsluftmenge in Funktion von Nennwärmeleistung und Wassergehalt

20.9 Bestimmung des Abgasvolumenstroms

Der Abgasvolumenstrom einer Holzfeuerung entspricht im trockenen Zustand bei Normbedingungen (0 °C und 1’013 mbar) etwa der zur Erzeugung einer bestimmten Nennwärmeleistung notwendigen Verbrennungsluftmenge.

$$\dot{V}_{AGtr} \approx \dot{V}_L \quad \left[\frac{m^3}{h}\right]$$

Der Abgasvolumenstrom im Betriebszustand, d. h. feuchtes Abgas bei Abgastemperatur und Umgebungsdruck, kann durch Umrechnen von trockenem auf feuchtes Abgas (siehe Kap. 20.5) und durch Umrechnung von Norm- auf Betriebsbedingungen bestimmt werden:

$$\dot{V}_{AG} = \dot{V}_L * f * \frac{(273 + T_{AG}) * 1'013}{273 * p} \quad \left[\frac{m^3}{h}\right]$$

mit:	$\dot{V}_L$	=	Verbrennungsluftmenge	[m³/h]
	$\dot{V}_{AGtr}$	=	Abgasvolumenstrom, trocken, bei Normbedingungen (0 °C, 1’013 mbar)	[m³/h]
	$\dot{V}_{AG}$	=	Abgasvolumenstrom, feucht, bei Betriebsbedingungen (T_{AG} und p)	[m³/h]
	f	=	Umrechnungsfaktor, Abgas feucht zu Abgas trocken	[–]
	T_{AG}	=	Abgastemperatur	[°C]
	p	=	Umgebungsdruck	[mbar]

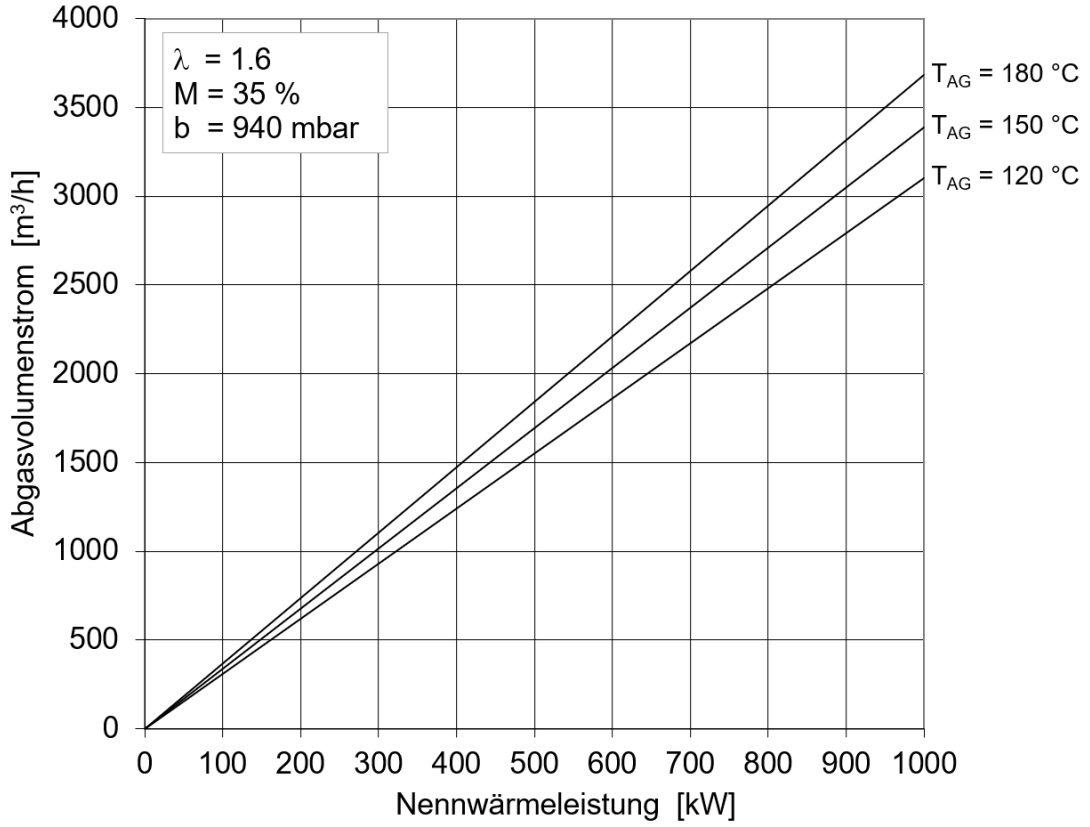


Bild 20.5 Abgasvolumenstrom im Betriebszustand in Funktion der Nennwärmeleistung

20.10 Bestimmung des NO_x-Massenstroms

Stickoxide (NO_x) müssen in der Regel erst dann einen Emissionsgrenzwert einhalten, sobald sie einen vorgegebenen NO_x-Massenstrom überschreiten. So ist beispielsweise in der Schweiz ein Emissionsgrenzwert von 250 mg/m³ (bei Bezugssauerstoffgehalt) einzuhalten, sobald der NO_x-Massenstrom 2'500 g/h überschreitet. In der Planungsphase eines Holzheizwerkes ist es deshalb wichtig, den NO_x-Massenstrom abzuschätzen, um entscheiden zu können, ob ein NO_x-Minderungsverfahren notwendig sein wird (siehe Kap. 13.9.2).

Der NO_x-Massenstrom wird berechnet aus dem Abgasvolumenstrom bei Nennleistung und der NO_x-Konzentration beim gemessenen Sauerstoffgehalt:

$$\dot{NO}_x = \dot{V}_{AGtr} * \frac{NO_x}{1'000} \qquad \left[\frac{g}{h}\right]$$

Wenn die NO_x-Konzentration beim gemessenen Sauerstoffgehalt nicht bekannt ist, kann sie aus einer NO_x-Konzentration bei Bezugssauerstoffgehalt und der Annahme eines Sauerstoffgehalts wie folgt abgeschätzt werden:

$$NO_x = NO_{x\,O_2\,Bezug} * \frac{21 - O_2}{21 - O_{2Bezug}} \qquad \left[\frac{mg}{m^3}\right]$$

mit:	$\dot{NO}_x$	=	NO_x-Massenstrom	[g/h]
	$\dot{V}_{AGtr}$	=	Abgasvolumenstrom, trocken, bei 0 °C, 1'013 mbar	[m³/h]
	NO_x	=	NO_x-Konzentration im trockenen Abgas beim gemessenen Sauerstoffgehalt	[mg/m³]
	$NO_{x\,O2\,Bezug}$	=	NO_x-Konzentration im trockenen Abgas bei Bezugssauerstoffgehalt	[mg/m³]
	O_2	=	Sauerstoffgehalt (gemessen bei Nennleistung)	[Vol.-%]
	$O_{2\,Bezug}$	=	Bezugssauerstoffgehalt	[Vol.-%]

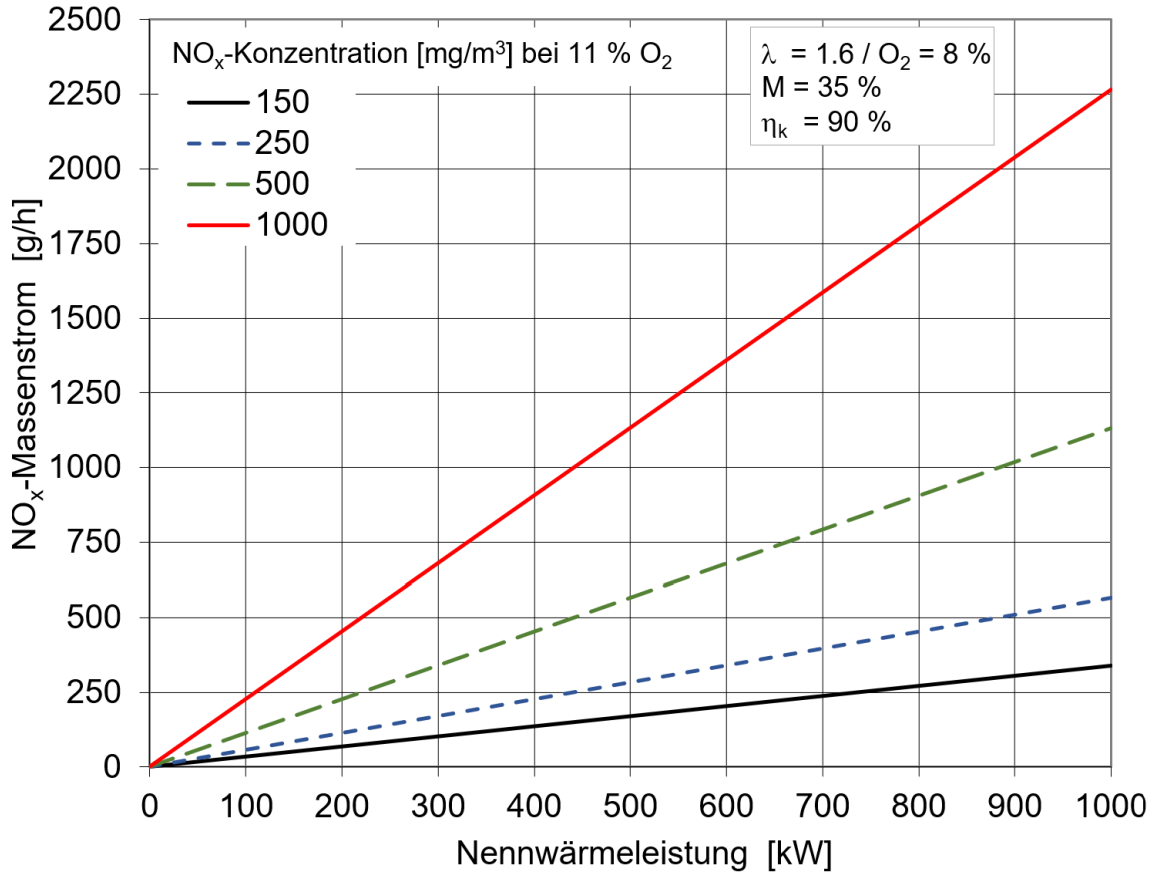


Bild 20.6 NO_x-Massenstrom in g/h in Funktion der Nennwärmeleistung in kW und verschiedener NO_x-Konzentrationen.

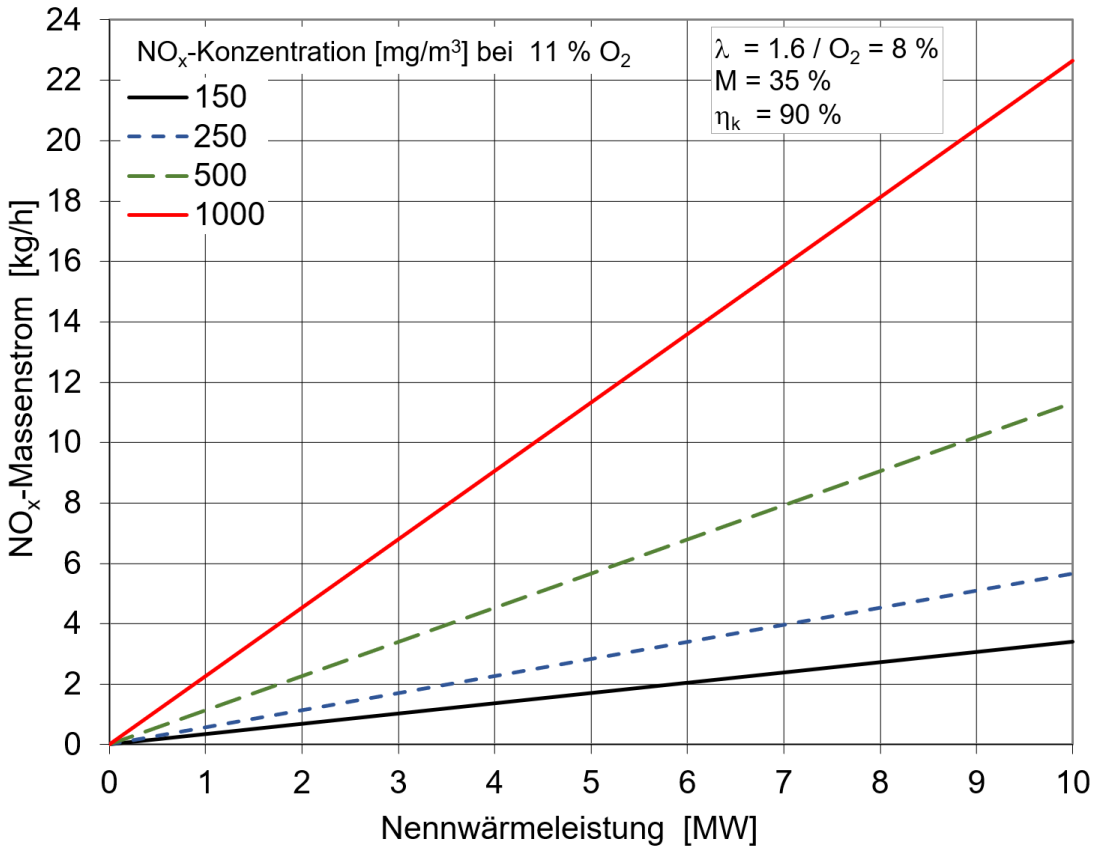


Bild 20.7 NO_x-Massenstrom in kg/h in Funktion der Nennwärmeleistung in MW und verschiedener NO_x-Konzentrationen.

20.11 Bestimmung des feuerungstechnischen Wirkungsgrades

Zur Berechnung des feuerungstechnischen Wirkungsgrades wird der Energieinhalt der einzelnen Abgaskomponenten bestimmt. Ausgehend von der Verbrennungsgleichung von Holz können die thermischen und chemischen Abgasverluste berechnet werden. Nussbaumer und Good [60] haben eine vereinfachte Formel für Holzbrennstoffe hergeleitet, welche für technische Anwendungen eine ausreichend hohe Genauigkeit ergibt. Im Bereich CO < 0.5 Vol.-%, CO_2 > 5 Vol.-%, Abgastemperatur < 400 °C gilt für den feuerungstechnischen Wirkungsgrad von Holzfeuerungen danach:

$$\eta_f = 100 - V_{therm} - V_{chem} \quad [\%]$$

wobei: V_{therm} = thermische Verluste durch fühlbare Wärme der Abgase [%]

V_{chem} = chemische Verluste durch unvollständige Verbrennung [%]

$$V_{therm} = \frac{(T_A - T_U) * \left(1.39 + \frac{122}{CO_2 + CO} + 0.02 * \frac{M}{100 - M} * 100\right)}{\frac{18'300}{100} - 0.2442 * \frac{M}{100 - M} * 100} \quad [\%]$$

$$V_{chem} = \frac{CO}{CO_2 + CO} * \frac{11'800}{\frac{18'300}{100} - 0.2442 * \frac{M}{100 - M} * 100} \quad [\%]$$

Lambda λ: $\lambda = \frac{21}{21 - O_2 + 0.4\,CO} = \frac{20.4}{CO_2 + CO} \quad [-]$

Falls O_2 anstelle von CO_2 gemessen wird: $CO_2 = 0.98\,(21 - O_2) - 0.61\,CO$ [Vol.-%]

mit:	T_A	=	Abgastemperatur	[°C]
	T_U	=	Umgebungstemperatur	[°C]
	O_2	=	Sauerstoffkonzentration	[Vol.-%]
	CO_2	=	Kohlendioxidkonzentration	[Vol.-%]
	CO	=	Kohlenmonoxidkonzentration	[Vol.-%]
	u	=	Holzfeuchtigkeit bezogen auf absolut trockenes Holz	[m.-%]
	M	=	Wassergehalt des feuchten Holzes	[m.-%]
	λ	=	Luftüberschusszahl	[–]

Hinweis: Zur Berechnung der Holzfeuchte (Holzfeuchtigkeit) u aus dem Wassergehalt M kann folgende Umrechnung verwendet werden:

$$u = \frac{\frac{M}{100}}{1 - \frac{M}{100}} \quad [-]; \; u = \frac{M}{100 - M} * 100 \quad [m.-\%]$$

oder

$$M = \frac{\frac{u}{100}}{1 + \frac{u}{100}} \quad [-]; \; M = \frac{u}{100 + u} * 100 \quad [m.-\%]$$

Diese Methode liefert vergleichbare Werte mit der Berechnung nach DIN EN 14394:2008-12 [147]. Die Formel kann bei Bedarf für Brennstoffe mit von Holz abweichender Zusammensetzung angepasst werden [60]. Eine rasche Abschätzung der Zahlenwerte kann auch grafisch mit den entsprechenden Nomogrammen durchgeführt werden (Bild 20.8).

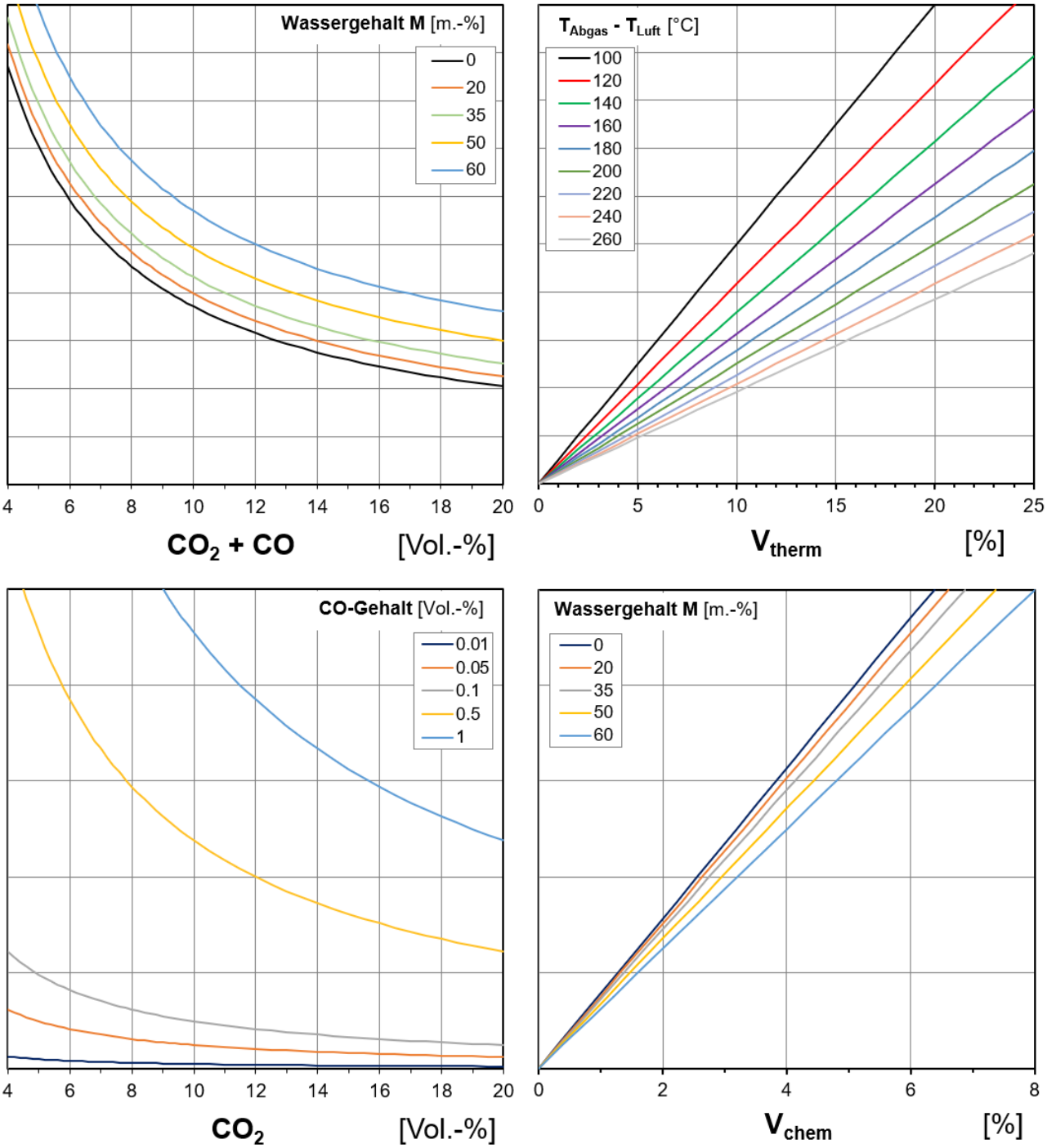


Bild 20.8 Nomogramme zur Bestimmung des feuerungstechnischen Wirkungsgrads mit $\eta_f = 100 - V_{therm} - V_{chem}$ [%]

20.12 Ermittlung des Jahresnutzungsgrades

Mit dem folgenden Berechnungsweg kann der Jahresnutzungsgrad η_a mit einer Genauigkeit von ca. ± 5 % bestimmt werden, sofern ein Wärmezähler im Kesselkreis vorhanden ist. Der Jahresnutzungsgrad ist abhängig von den Verlusten, der Auslastung α und der mittleren Laststufe L der Feuerungsanlage. Die Berechnung geht von einer Feuerung aus, deren Kesselwirkungsgrad η_k auf durchschnittlichen Betriebsparametern basiert. Für Feuerungen mit anderen Betriebsparametern wird der Kesselwirkungsgrad η_k mit Hilfe von Korrekturtermen angepasst. Mit der Auslastung α, dem Kesselwirkungsgrad η_k und der mittleren Laststufe L kann der Jahresnutzungsgrad η_a berechnet werden ([137], [148]).

Es wird angenommen, dass der Kesselwirkungsgrad η_k über den ganzen Lastbereich konstant ist. Der höhere relative Anteil der Strahlungsverluste im Teillastbetrieb wird durch tiefere Abgastemperaturen kompensiert.

Zeitliche Auslastung α

$$\alpha = \frac{\text{Betriebszeit Feuerung}}{\text{Einschaltdauer der Feuerung}} = \frac{t_{Betrieb}}{t_{Ein}} \quad [-]$$

Die Einschaltdauer umfasst die reguläre Betriebs- und die Bereitschaftszeit (Glutbettunterhalt) einer Feuerungsanlage zwischen dem Anfeuern zu Beginn der Heizperiode und dem Ausschalten am Ende der Heizperiode. Betriebs- und Bereitschaftszeit werden in der Regel mit einem Betriebsstundenzähler oder über die SPS-Steuerung erfasst.

Kesselwirkungsgrad η_k

Der Kesselwirkungsgrad η_k beträgt für eine automatische Holzschnitzelfeuerung mit den nachfolgenden Betriebsparametern:

Betriebsparameter:	Abgastemperatur	T_{AG}	=	120 °C
	Luftüberschusszahl	λ	=	1.6
	Wassergehalt	M	=	38 m.-%
	Holzfeuchtigkeit	u	=	60 % atro
	Feuerungstechnischer Wirkungsgrad	η_f	=	93 % (Nomogramm in Bild 20.8)
	Strahlungsverluste	q_s	=	1.5 %
	Kesselwirkungsgrad	η_k	=	η_f – qs = 93 – 1.5 = 91.5 %

Eine gegebenenfalls bestehende Differenz der realen zu den angenommenen Strahlungsverlusten q_s von 1.5 % kann direkt zum Kesselwirkungsgrad η_k addiert oder subtrahiert werden. Falls die Strahlungsverluste q_s nicht bekannt sind, kann näherungsweise angenommen werden, dass diese die Hälfte der Bereitschaftsverluste q_B betragen. Für die anderen Betriebsparameter gelten die folgenden Korrektursummanden:

pro Δ u	=	10 %	feuchteres Holz	0.4 % geringerer Kesselwirkungsgrad η_k
pro Δ λ	=	0.1	grösserer Luftüberschuss	0.6 % geringerer Kesselwirkungsgrad η_k
pro ΔT_{AG}	=	10 °C	höhere Abgastemperatur	1.0 % geringerer Kesselwirkungsgrad η_k

Die Korrektursummanden gelten auch im umgekehrten Sinn.

Mittlere Laststufe L

Die gemittelte Laststufe L, mit welcher die Feuerung im Durchschnitt über die Betriebszeit läuft, kann wie folgt berechnet werden:

$$L = \frac{\Delta\ WZ\ *\ 100\%}{\dot{Q}_N\ *\ t_{Betrieb}} \quad [\%]$$

mit:	Δ WZ	=	Wärmezähler Endwert – Wärmezähler Anfangswert	[kWh]
	$t_{Betrieb}$	=	Betriebszeit der Feuerung	[h]
	$\dot{Q}_N$	=	Nennwärmeleistung	[kW]

Bereitschaftsverluste q_B

Bereitschaftsverluste treten in den Standby-Phasen auf, also nach jedem Ausschalten eines Holzkessels. Sie umfassen die Verluste durch Auskühlung des Holzkessels und den Brennstoffeinsatz (Glutbettunterhalt), um den Holzkessel betriebsbereit auf Temperatur zu halten. Bei Holzkesseln mit leichter Bauweise ohne Glutbettunterhalt (Seriengeräte mit automatischer Zündung) sind die Bereitschaftsverluste geringer, bei Holzkesseln mit schwerer Bauweise mit Glutbettunterhalt (Industriekessel) sind sie höher.

Für eine moderne Anlage mittlerer Grösse betragen die Bereitschaftsverluste q_B ca. 3 %. Als Richtwerte für andere Anlagegrössen können die Angaben in Tabelle 20.4 verwendet werden.

Tabelle 20.4 Richtwerte für Bereitschaftsverluste q_B.

Feuerungstyp	Bereitschaftsverluste q_B
Seriengerät bis 300 kW	$q_B \geq 1\ \% - 3\ \%$
Industriekessel bis 300 kW	$q_B \geq 3\ \% - 5\ \%$
Industriekessel > 300 kW	$q_B \geq 1\ \% - 3\ \%$

Jahresnutzungsgrad η_a

Mit der zeitlichen Auslastung α, dem Kesselwirkungsgrad η_k, den Bereitschaftsverlusten q_B und der gemittelten Laststufe L kann mit der untenstehenden Formel der Jahresnutzungsgrad η_a wie folgt berechnet werden (siehe Bild 20.9):

$$\eta_a = \eta_k \frac{1}{1 + \frac{q_B * (1 - \alpha)}{L * \alpha}} \quad [\%]$$

mit:

	α	=	Zeitliche Auslastung	[–]
	η_k	=	Kesselwirkungsgrad	[%]
	q_B	=	Bereitschaftsverluste	[%]
	L	=	mittlere Laststufe	[%]

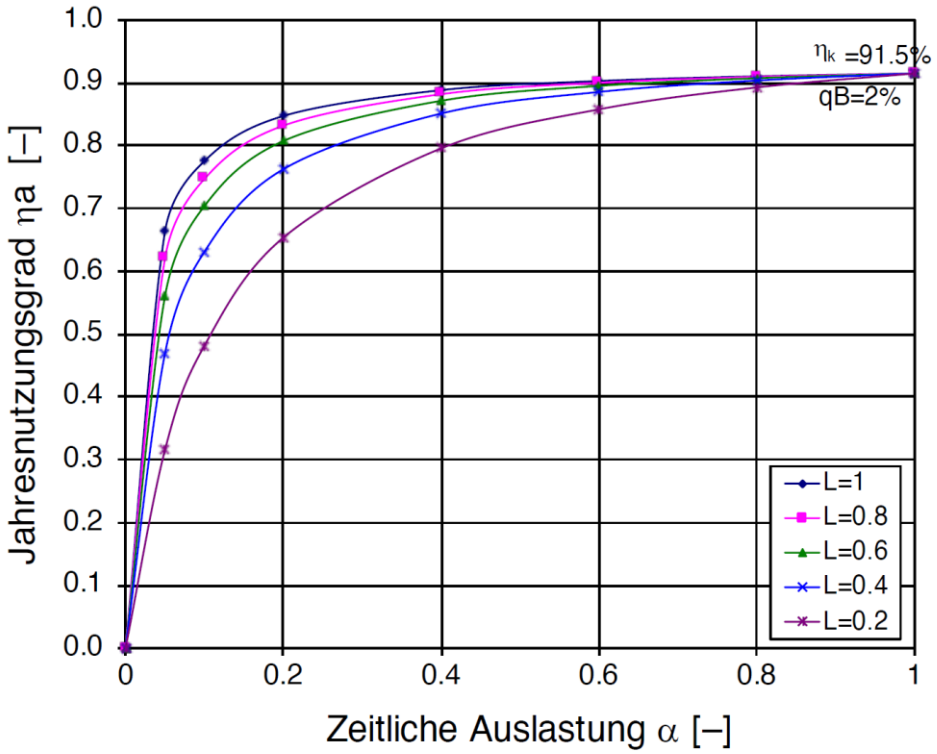


Bild 20.9 Jahresnutzungsgrad eines Holzkessels in Abhängigkeit seiner zeitlichen Auslastung [148]
mit η_k: Kesselwirkungsgrad; q_B: Bereitschaftsverluste; L: Mittlere Laststufe.

Rechenbeispiel

Wärmezähler	**Feuerung**	
Abgelesene Differenz am Wärme-	Nennwärmeleistung	700 kW
zähler über eine Heizperiode	Luftüberschusszahl	λ = 1.6
Δ WZ = 997’647 kWh	Abgastemperatur	T_{AG} = 120 °C
	Holzfeuchtigkeit	u = 60 %
	Wassergehalt	M = 38 m.-%
	Strahlungsverluste	q_s = 1.5 %
	Bereitschaftsverluste	q_B = 2.0 %
	Einschaltdauer	Heizperiode
	Betriebszeit	2’036 h

Berechnung der zeitlichen Auslastung α:

Einschaltdauer: Heizperiode: 15. September bis 4. April = 202 Tage = 4’848 h; Betriebszeit: 2’036 h

$$\alpha = \frac{\text{Betriebszeit Feuerung}}{\text{Einschaltdauer der Feuerung}} = \frac{2'036\ \text{h}}{4'848\ \text{h}} = 0.42$$

Bestimmung des Kesselwirkungsgrads η_k:

Feuerungstechnischer Wirkungsgrad	η_f	= 93 % (Bestimmung mit Nomogramm Bild 20.8)
Strahlungsverluste	q_s	= 1.5 %
Kesselwirkungsgrad	η_k	= 93 % – 1.5 % = 91.5 %

Berechnung der mittleren Laststufe L:

$$L = \frac{\Delta\ WZ\ *\ 100\%}{\dot{Q}_N\ *\ t_{Betrieb}} = \frac{997'647\ \text{kWh}\ *\ 100\%}{700\ \text{kW}\ *\ 2'036\ \text{h}} = 70\%$$

Berechnung des Jahresnutzungsgrads η_a:

$$\eta_a = \eta_k\ \frac{1}{1 + \frac{q_B\ *\ (1 - \alpha)}{L\ *\ \alpha}} = 91.5\%\ *\ \frac{1}{1 + \frac{2\%\ *\ (1 - 0.42)}{70\%\ *\ 0.42}} = 88\%$$

20.13 Gebräuchliche Einheiten und Umrechnungen

Tabelle 20.5 Gebräuchliche Masseinheiten für Energieholz. Umrechnung siehe Tabelle 20.6.

Symbol	Bedeutung
m^3	Kubikmeter (feste Holzmasse ohne Zwischenraum), 1 m^3 = 1 fm ≈ 2.5 ... 2.8 Srm
fm	Festmeter (feste Holzmasse ohne Zwischenraum), 1 fm = 1 m^3 ≈ 2.5 ... 2.8 Srm
Srm	Schüttraummeter, CH: Schnitzelkubikmeter Sm^3
Raummeter (Ster)	1x1x1 m aufgeschichtete Holzscheiter (mit Zwischenräumen) = 0.7 fm = 0.7 m^3

Tabelle 20.6 Umrechnungstabelle (Richtwerte für Holz mit M = 15 %).

		Weichholz WH Fi/Ta	Hartholz HH Bu
Festes Holz		2.5 ... 2.8 Srm	2.5 ... 2.8 Srm
1 m^3 = 1 Festmeter (fm)	entspricht	1.4 Raummeter (Ster)	1.4 Raummeter (Ster)
		550 kg Holz	750 kg Holz
		200 Liter Heizöl extra leicht	280 Liter Heizöl extra leicht
		2'000 kWh 7'200 MJ	2'800 kWh 10'080 MJ
Hackschnitzel		0.36 m^3 (fm)	0.36 m^3 (fm)
1 Schüttraummeter (Srm)	entspricht	0.5 Raummeter (Ster)	0.5 Raummeter (Ster)
		160 - 200 kg Holz	250 - 270 kg Holz
		70 Liter Heizöl extra leicht	100 Liter Heizöl extra leicht
		700 kWh 2'520 MJ	1'000 kWh 3'600 MJ

Tabelle 20.7 Vorsätze und Vorsatzzeichen

Kilo	**k**	10^3
Mega	**M**	10^6
Giga	**G**	10^9
Tera	**T**	10^{12}
Peta	**P**	10^{15}
Exa	**E**	10^{18}

Megawattstunde:	1 MWh = 1'000 kWh
Gigawattstunde:	1 GWh = 1 Mio. kWh
Terawattstunde:	1 TWh = 1 Mrd. kWh

Tabelle 20.8 Einheiten für Energie und Leistung

Joule	**J**	für Energie, Arbeit, Wärmemenge
Watt	**W**	für Leistung, Energiestrom, Wärmestrom

1 Joule (J) = 1 Newtonmeter (Nm) = 1 Wattsekunde (Ws)

Für Deutschland als gesetzliche Einheiten verbindlich seit 1978. Die Kalorie und davon abgeleitete Einheiten wie Steinkohleneinheit und Rohöleinheit werden noch hilfsweise verwendet.

Tabelle 20.9 Umrechnungsfaktoren für Energieeinheiten

		kJ	kcal	kWh
1 Kilojoule	kJ	1	0.2388	0.000278
1 Kilokalorie	kcal	4.1868	1	0.001163
1 Kilowattstunde	kWh	3'600	860	1
1 kg Steinkohleneinheit	SKE	29'308	7'000	8.14
1 kg Rohöleinheit	RÖE	41'868	10'000	11.63

Die Zahlen beziehen sich auf den Heizwert.

21 Glossar

Begriffe	Bedeutung
Abwärme	Als Abwärme werden Wärmeströme bezeichnet, die als Nebenprodukt von Prozessen anfallen und ungenutzt sowie oft mit zusätzlichem Energieaufwand für Pumpen, Ventilatoren, Rückkühler oder Kälteanlagen an die Umgebung abgegeben werden und zu unerwünschter Erwärmung beitragen (siehe Kapitel 13.7.5).
Anschlussdichte (Wärmebelegung)	Die Anschlussdichte (siehe Kapitel 12.2.6) ist das Verhältnis zwischen der jährlich abgesetzten Wärmemenge in MWh/a und der gesamten Trassenlänge von Haupt-, Zweig- und Hausanschlussleitungen in Metern. Die Anschlussdichte kann auch für einzelne Teilnetze oder Netzstränge berechnet und zur Beurteilung genutzt werden.
(abonnierte) Anschlussleistung	Die Anschlussleistung oder abonnierte Anschlussleistung ist die vertraglich vereinbarte maximale Wärmebezugsleistung eines an ein Fernwärmenetz angeschlossenen Wärmeabnehmers (Wärmekundin oder -kunde). Die Anschlussleistung (auch Gesamtanschlussleistung) eines Fernwärmenetzes ist die Summe der Anschlussleistungen aller Wärmeabnehmerinnen und -abnehmer.
Ausführung	Projektphase, in der die Realisierung der Anlage erfolgt. Im Zuge der Ausführung/Realisierung ist eine fachgerechte Bauüberwachung beziehungsweise örtliche Bauaufsicht durchzuführen.
Ausschreibung und Vergabe	Projektphase, in der das Ausschreibungsprojekt ausgeschrieben und vergeben wird. Hierfür ist auch der Begriff Ausschreibungsplanung gebräuchlich. Dies beinhaltet die Erstellung und Versendung der Ausschreibungsunterlagen, die Vorbereitung der Vergabe (Angebotsvergleich, Preisspiegel) und die Mitwirkung bei der Vergabe. Basis zur Erstellung der Ausschreibung ist das Ausschreibungsprojekt, welches den Planungsstand der Anlage zum Zeitpunkt der Ausschreibung darstellt.
Bandlast (Grundlast, Grundlastabdeckung)	Bandlast (Grundlast) bezeichnet eine dauerhaft, also während der gesamten Betriebsdauer (Heizsaison oder dem gesamten Jahr (8760 Stunden)) benötigte Leistung. Die Bandlast eines Fernwärmenetzes setzt sich aus den saisonal unabhängigen Leistungsbedarfen der Verbraucher (z. B. für Warmwasserbereitung, Prozesswärme etc.) plus den Netzverlusten zusammen. Grundlastabdeckung bezeichnet eine Wärmeerzeugungseinheit, die vorwiegend zur Deckung der Grundlast eingesetzt wird (z. B. eine WKK-Anlage).
Betriebsoptimierung	Mit der Betriebsoptimierung wird nach der Übergabe der Anlage an die Bauherrschaft die Funktionsweise der Anlage systematisch überprüft und optimiert. Die Betriebsoptimierung fällt bei QM Holzheizwerke in den Verantwortungsbereich der ausführenden Unternehmen unter der Leitung des Hauptplaners (siehe Kapitel 16).
Biomasse (Holzbrennstoffe)	Biomasse umfasst die gesamte organische Substanz, die von Pflanzen, Tieren und Menschen anfällt. Biomasse für energetische Zwecke kommt aus der Landwirtschaft, Forstwirtschaft und von biogenen Reststoffen (Abfälle). Bei Biomasse, die für die Verbrennung geeignet ist, spricht man von biogenen Festbrennstoffen. Dies sind holzartige Biomasse (Waldrestholz, Schwachholz, Industrierestholz, …), halmgutartige Biomasse (Stroh, …) und sonstige Biomasse (Getreideganzpflanzen, Schalen, Kerne, …). Im Gegensatz zur Verbrennung kann Biomasse auch durch Vergärung energetisch genutzt werden. Dazu wird vergärbare, also nicht holzartige Biomasse wie Gülle, Mist, Mais- und Grassilage, und diverse biogene Reststoffe aus der Landwirtschaft, der Lebensmittelindustrie, bis hin zu Bioabfall eingesetzt.
Bivalente Wärmeerzeugung	Wärmeerzeugung mit mindestens zwei unterschiedlichen Energieträgern; im Rahmen von QM Holzheizwerke bezieht sich bivalent vorwiegend auf die Heizzentrale mit einem oder mehreren Holzkesseln und einer fossilen Spitzenlastabdeckung und Ausfallsreserve. Im weiteren Sinn ist darunter jedoch jede Art von Wärmeerzeugungsanlagen zu verstehen, die unterschiedliche Energieträger einsetzt (z. B. Holz und Solarthermie, Holz und Abwärme, …).
Brennstoffbett	In der Feuerungstechnik bezeichnet das Brennstoffbett den Brennstoff in Form einer gleichmässigen Schüttung («Bett») auf einem Verbrennungsrost oder in einem Feuerraum.
Doppelrohr	Spezielle Bauweise eines werkseitig vorgedämmten Fernwärmerohres. Dabei werden das Vor- und das Rücklaufrohr (Mediumrohre) mit PUR-Schaum als Wärmedämmung in einem gemeinsamen Kunststoffmantelrohr verbaut. Es sind starre und flexible Ausführungen mit Stahlmedium- oder Kunststoffmediumrohr erhältlich.
Economiser	Ein Economiser (englisch für Vorwärmer/Sparanlage) ist ein Wärmeübertrager zur Wärmerückgewinnung durch Verwertung von Abwärme aus den unterschiedlichsten thermodynamischen oder industriellen Prozessen. In der Feuerungs- und Kesseltechnik dient der Economiser zur Rückgewinnung von Wärme aus dem heissen Abgas nach dem Kessel, wodurch die Abgastemperatur gesenkt und die Effizienz der Gesamtanlage erhöht wird.
Energiebezugsfläche	Die Energiebezugsfläche ist eine wichtige Gebäudekennzahl und ist die Summe aller ober- und unterirdischen Geschossflächen eines Gebäudes, für deren Nutzung ein Beheizen oder Klimatisieren notwendig ist. Die Energiebezugsfläche wird brutto berechnet, d. h. aus den äusseren Abmessungen einschliesslich begrenzender Wände und Brüstungen. Für abweichende Raumtemperaturen, hohe Räume usw. gibt es länderspezifische Korrekturfaktoren. Näherungsweise kann die beheizte Bruttogeschossfläche als Energiebezugsfläche angenommen werden.

Begriffe	Bedeutung
Begriffe	**Bedeutung**
Energieeffizienz-Index (EEI)	Bemessungsgrundlage dafür, welche Pumpenmodelle zukünftig zum Einsatz kommen dürfen, ist der sogenannte Energieeffizienzindex (EEI). Er wird nach einem in der Verordnung (EG) 641/2009 definierten Rechenverfahren ermittelt. Dabei wird die mittels eines Lastprofils ermittelte elektrische Durchschnittsleistung der Pumpe in Relation zu einer Referenzpumpe, das heisst einer durchschnittlichen Pumpe mit gleicher hydraulischer Leistung, betrachtet.
Entwurfsplanung	Projektphase, in der die technische Lösung des Projekts geplant und festgelegt wird. In CH wird dies auch «Vorprojekt» genannt, während in DE und AT mitunter auch von System- und Integrationsplanung gesprochen wird.
Expansion und Druckhaltung	Teilsystem im hydraulischen System (Wärmeerzeugung und Wärmeverteilung), welches die Volumenänderung des Warmwassers zwischen minimaler und maximaler Temperatur aufnimmt und so einen voreingestellten statischen Druck weitgehend konstant hält (Druckhaltung).
Fernwärme (Nahwärme)	Fernwärme beschreibt eine leitungsgebundene Wärmeversorgung der angeschlossenen Kundinnen und Kunden mit zentral erzeugter Wärme aus einer oder mehreren Heizzentralen. Die Rohrleitungsanlage mit allen nötigen Zusatzeinrichtungen (exklusive Erzeugung) wird als Fernwärmenetz bezeichnet. Als Wärmeträgermedium wird dabei Wasser (nur mehr selten Dampf) zum Transport der Wärme über zentrale Fernwärmepumpen und einen geschlossenen Rohrleitungskreislauf zu den Wärmeübergabestationen eingesetzt. Fernwärmenetze decken einen breiten Leistungsbereich mit Anschlussleistungen von weniger als 100 kW bis zu über 1 GW ab. Für kleinere Netze wird zum Teil auch der Begriff Nahwärme verwendet (speziell in AT und DE), wobei abgesehen von der Anlagengrösse keine grundsätzlichen technischen Unterschiede bestehen. In Deutschland wird damit die Übertragung von Wärme für Heizung und Warmwasser zwischen Gebäuden mit Leistungen zwischen 50 kW und einigen Megawatt beschrieben [78]. Von Minergie® wird der Begriff Nahwärme auch dann verwendet, wenn die Wärmeproduktionsanlage einige Gebäude oder Gebäudekomplexe versorgt, wobei nicht zwingend ein Verkauf an Dritte erfolgen muss [149]. Es gibt keine einheitliche Definition oder Grenze zwischen Nah- und Fernwärme und beide Begriffe finden im vorliegenden Planungshandbuch Anwendung. Im internationalen Sprachgebrauch gibt es diese Unterscheidung nicht. Weitere gleichbedeutende Synonyme für Fernwärmenetz sind Wärmeverteilnetz, Wärmenetz, thermisches Netz beziehungsweise auch Nahwärmenetz.
Geografisches Informationssystem (GIS)	Datenverarbeitungsanwendung zur Erfassung, Bearbeitung, Organisation, Analyse und Präsentation räumlicher Daten. Zur Planung von Fernwärmenetzen kann damit die Trassenführung unter Berücksichtigung der geografischen Gegebenheiten und der eventuell bereits vorhandenen anderen Versorgungssysteme (Wasser, Gas, Elektrizität etc.) festgelegt werden. Daneben kann das GIS auch zur Abschätzung des lokalen Energie- und Leistungsbedarfs genutzt werden.
Gleichzeitigkeit (Gleichzeitigkeitsfaktor)	Die Gleichzeitigkeit beschreibt in einem Verbund von Wärmeabnehmern den Effekt, dass bei einer grösseren Anzahl Wärmeabnehmerinnen und -abnehmern nie alle gleichzeitig die maximal vertraglich zugesicherte Wärmeleistung beziehen. Der Gleichzeitigkeitsfaktor beträgt 1 für einen einzigen Wärmeabnehmer und wird kleiner als 1 für mehrere Wärmeabnehmerinnen/Wärmeabnehmer. Er beschreibt das Verhältnis zwischen der effektiv erwarteten maximalen Abnahmeleistung aller Wärmeabnehmer und der gesamten abonnierten Anschlussleistung der Wärmeabnehmer.
Grädigkeit	Die Grädigkeit ist die min. Temperaturdifferenz zwischen einem wärmeabgebenden, heissen Medium und einem wärmeaufnehmenden, kälteren Medium an einem Wärmeübertrager. Sie dient unter anderem zur Bestimmung der technischen Güte eines Wärmeübertragungsprozesses. Die Grädigkeit sollte in der Regel so gering wie möglich sein (z. B. speziell bei Fernwärme-Übergabestationen, um eine niedrige Rücklauftemperatur im Wärmenetz zu erreichen). Bei der Auslegung eines Wärmeübertragers sind jedoch Nutzen und Aufwand (durch grössere Wärmeübertragerflächen) abzuwägen.
Hauptplanerin/Hauptplaner	Planende Person, welche gegenüber der Bauherrschaft für die Qualität der Gesamtanlage verantwortlich ist. Für eine Projektierung nach QM Holzheizwerke muss im Q-Plan immer eine Hauptplanerin oder ein Hauptplaner bezeichnet werden.
Hausanlage	Die Hausanlage besteht aus dem Verteilsystem im Gebäude zur Verteilung von Raum- und Prozesswärme sowie Warmwasser.
Hausanschluss (-leitung)	Verbindungsleitung zwischen Wärmeverteilnetz und Übergabestation.
Hausstation	Die Hausstation besteht aus der Übergabestation und der Hauszentrale.
Hauszentrale	Die Hauszentrale ist das Bindeglied zwischen der Übergabestation und der Hausanlage. Sie dient der Anpassung der Wärmelieferung an die Hausanlage hinsichtlich Druck, Temperatur und Volumenstrom. Bei der Gestaltung der Hauszentrale ist zwischen direktem und indirektem Anschluss (mit/ohne Wärmeübertrager zur hydraulischen Trennung) zu unterscheiden.
Heisswasser	Der Begriff Heisswasser bezeichnet in der Energietechnik das Wärmeträgermedium Wasser mit Vorlauftemperaturen über 110 °C (vgl. Warmwasser). Für Heisswasseranlagen gelten im Vergleich zu Warmwasseranlagen andere Normen, Richtlinien und Vorschriften und insbesondere höhere Sicherheitsvorkehrungen.

Begriffe	Bedeutung
Heizwerk Fernheizwerk Heizzentrale	Zentrale Anlage zur Bereitstellung von Wärme für grössere Objekte/Gebäude/Betriebe, einen kleinen Wärmeverbund oder ein Fernwärmenetz.

Begriffe	Bedeutung
Heizkraftwerk	Energieerzeugungsanlage für die gleichzeitige Erzeugung von Wärme und Strom (siehe auch Wärme-Kraft-Kopplung).
Jahreswärmebedarf (Nutzwärmebedarf)	Der Jahreswärmebedarf eines Verbrauchers ist dessen an der Wärmeübergabestelle anfallender jährlicher Nutzwärmebedarf. Für ein Fernwärmenetz ist der Jahreswärmebedarf der jährliche Wärmebedarf am Einspeisepunkt (Schnittstelle zwischen Wärmeerzeugung und Wärmeverteilnetz) und beinhaltet auch die Wärmeverluste des Fernwärmenetzes.
Jahreswärmeproduktion	Die Jahreswärmeproduktion ist die Summe der Wärmeproduktion aller Wärmeerzeugungsanlagen (unabhängig vom Energieträger) in einem Jahr.
Jahresarbeitszahl (JAZ)	Die Jahresarbeitszahl beschreibt das Verhältnis der Jahreswärmeproduktion zu der im gleichen Zeitraum zugeführten elektrischen oder thermischen Antriebsenergie einer Wärmepumpe. Sie beschreibt somit die Effizienz einer Wärmepumpe über eine längere Betriebsperiode im Gegensatz zum Momentanwert der Leistungszahl (siehe auch Leistungszahl).
Jährliche Betriebsstunden	Effektive Anzahl der Stunden pro Jahr, während deren eine Anlage betrieben wird. Die Zählung der Betriebsstunden erfolgt im Gegensatz zu einer Vollbetriebsstunde unabhängig vom jeweiligen Lastzustand, d. h. eine Betriebsstunde bei 50 % Leistung gilt als eine Betriebsstunde (vgl. Vollbetriebsstunden).
Kesseleintrittstemperatur	Temperatur des Wärmeträgermediums gemessen in der Rohrleitung direkt am Eintritt in den Kessel (nach der Rücklauftemperaturhochhaltung!).
Kesselaustrittstemperatur	Temperatur des Wärmeträgermediums gemessen in der Rohrleitung direkt am Austritt aus dem Kessel. Die Kesselaustrittstemperatur ist eine grundlegende Regelgrösse für den Kessel.
Kesselwirkungsgrad	Die von einem Heizkessel wasserseitig produzierte Nutzenergie dividiert durch die im Brennstoff als Heizwert zugeführte Energie. Die Bestimmung erfolgt entweder im stationären Zustand ohne Speichereffekte (z. B. bei automatischen Feuerungen) oder über einen gesamten Abbrandprozess (z. B. bei handbeschickten Feuerungen).
Kombiventil	Kombiventile sind spezielle Ventile, die vorwiegend in Fernwärme-Übergabestationen eingesetzt werden, um sowohl eine Volumenstrombegrenzung als auch eine Differenzdruckregelung mit nur einer Armatur zu realisieren. Über die einstellbare Volumenstrombegrenzung wird der maximal mögliche Volumenstrom und dadurch die maximale Leistung (= abonnierte Anschlussleistung) der Übergabestation eingestellt. Weiters wird der Differenzdruck und somit der primärseitige Durchfluss in Abhängigkeit der gemessenen Sekundär-Vorlauftemperatur geregelt, um die geforderte Soll-Vorlauftemperatur auf der Sekundärseite zu erreichen.
Lastkennlinie	Die Lastkennlinie ist die Darstellung des Wärmeleistungsbedarfs in Abhängigkeit des Tagesmittelwertes der Aussentemperatur. Für die Aussentemperatur ist dabei immer der 24-Stunden-Mittelwert einzusetzen; hingegen kann der Wärmeleistungsbedarf ein Tagesmittelwert (z. B. für Wohnbauten) oder ein Spitzenwert (z. B. für Bürogebäude) sein. Die Lastkennlinie der Gesamtanlage ergibt sich aus der Stapelung mehrerer Lastkennlinien (siehe Kapitel 11.3.2).
Leistungszahl (COP)	Die Leistungszahl (Coefficient of Performance – COP) ist das Verhältnis der erzeugten Nutzwärmeleistung zur zugeführten elektrischen oder thermischen Antriebsleistung einer Wärmepumpe. Sie beschreibt einen Momentanwert oder einen über eine kurzfristige Betrachtungsdauer bestimmten Wert. Die thermodynamisch (theoretisch) maximal erreichbare Leistungszahl wird als Carnot-COP bezeichnet. Dieser kann mit Hilfe eines produktspezifischen Gütegrades auf den tatsächlichen COP einer Wärmepumpe umgerechnet werden. Zur Bewertung über eine längere Betrachtungsdauer dient die Jahresarbeitszahl (siehe Jahresarbeitszahl).
Maximal zulässige Betriebstemperatur	Maximale über eine kurze Zeitperiode zulässige Betriebstemperatur einer Anlage (Wärmeerzeugung, Wärmenetze, …).
Maximale Dauerbetriebstemperatur	Maximale, ohne zeitliche Einschränkung zulässige Betriebstemperatur.
Meilenstein	QM Holzheizwerke setzt 5 Meilensteine zur Qualitätssicherung am Ende der wichtigsten Projektphasen (siehe Kapitel 2.3.3): 1. Etablierung QM Holzheizwerke und Q-Planung als Abschluss von Projektphase 1 2. Q-Prüfung und Q-Lenkung auf Stufe Entwurfsplanung als Abschluss von Projektphase 2 3. Q-Prüfung und Q-Lenkung auf Stufe Ausschreibungsprojekt als Abschluss von Projektphase 3 4. Q-Prüfung und Q-Lenkung auf Stufe Abnahme als Abschluss von Projektphase 5 5. Q-Prüfung und Abschluss QM Holzheizwerke nach einem Betriebsjahr als Abschluss von Projektphase 6
Monovalente Wärmeerzeugung	Wärmeerzeugung mit einem einzigen Energieträger, z. B. Heizzentrale, die ausschliesslich mit Holzkesseln betrieben wird (vgl. bivalente Wärmeerzeugung).

Begriffe	Bedeutung
Nenndruck PN (Pressure Nominal)	Der Nenndruck gibt für ein Rohrleitungssystem eine Referenzgrösse bezüglich Auslegungsdruck an. Die Angabe erfolgt nach DIN, EN und ISO durch die Bezeichnung PN (Pressure Nominal) gefolgt von einer Zahl, die den Auslegungsdruck in bar bei Raumtemperatur (20 °C) angibt. Definition und Auswahl erfolgt entsprechend EN 1333 [150].

Begriffe	Bedeutung
Nenndurchmesser DN, Nennweite, nominaler Durchmesser	Der Nenndurchmesser gibt für ein Rohrleitungssystem einen Referenz-Durchmesser an, mit dem die Grösse und Kompatibilität von Bauteilen definiert wird. Der Nenndurchmesser ist Teil der Bezeichnung des Bauteils nach EN ISO 6708 [151] und ist nicht identisch mit dem Innen- oder Aussendurchmesser eines Rohres oder Bauteiles.
Nennwärmeleistung	Höchste Dauerleistung einer Anlage (z. B. Holzkessel), für die diese gemäss Herstellerangaben und den dort definierten Brennstoffen ohne zeitliche Einschränkung ausgelegt ist.
Netzdruck	Als Netzdruck wird der Druck in der Fernwärmeleitung bezeichnet.
Netzschlechtpunkt (Schlechtpunkt)	Position in einem Wärmenetz mit dem geringsten Differenzdruck zwischen Vor- und Rücklauf. Dieser Punkt liegt in der Regel bei einer von der/den Heizzentrale(n) weit entfernten Übergabestation, kann aber in Abhängigkeit des momentanen Betriebszustandes des Wärmenetzes (Abnahme- und Einspeisesituation) wandern. Der Netzschlechtpunkt dient als Auslegungsgrösse für die Netzpumpen (Hauptpumpeneinheit). Durch den Einbau von Differenzdrucksensoren am Schlechtpunkt im Netz können die Netzpumpen auch in Abhängigkeit des Differenzdruckes am Schlechtpunkt geregelt werden.
Netztemperatur	Mit Netztemperatur wird die gemeinsame Angabe der Vorlauf- und Rücklauftemperatur in Grad Celsius (z. B. 80/50) beschrieben und ist als typischer Wert für ein Wärmenetz (eventuell mit Unterscheidung Sommerbetrieb/Winterbetrieb) zu verstehen.
Netztrennung	Die Netztrennung bezeichnet die Trennung von zwei Netzabschnitten oder des Netzes von den Erzeugungseinheiten. Dies kann beispielsweise durch einen Wärmeübertrager (technisch getrennt, separate Wärmeträgermedien) oder eine hydraulische Weiche (hydraulische Trennung, gemeinsames Wärmeträgermedium) realisiert werden.
Netzverluste (Wärmeverteilverluste)	Die Wärmeverteilverluste sind eine wichtige Kenngrösse für Wärmenetze (und werden auch als Netzverluste bezeichnet). Sie sind definiert als Differenz zwischen der einem Wärmenetz (von der Erzeugung) zugeführten und der von allen Wärmeabnehmern bezogenen Wärmemenge (Summe der Wärmeabnahme der einzelnen Abnehmerinnen/-abnehmer). Die Wärmeverteilverluste können als Absolutwert (= Differenz der Wärmemengen) oder als Relativwert (prozentuelle Netzverluste) dargestellt werden. Bei den relativen Netzverlusten wird die Differenz zwischen Einspeisung und Abnahme durch die eingespeiste Wärmemenge dividiert. Bestimmend für die Netzverluste ist die vorherrschende Netzverlustleistung, die von der Temperaturdifferenz zwischen Fernwärmemedium und Umgebung (Erdreich), der Dämmqualität der Fernwärmerohre und der Rohrdimension abhängt.
Nutzungsgrad, Jahresnutzungsgrad	Der Nutzungsgrad ist das Verhältnis zwischen der in einem längeren Betrachtungszeitraum erzeugten Nutzenergie und der im gleichen Betrachtungszeitraum zugeführten Energie. Dies entspricht der im Betrachtungszeitraum aufsummierten Nutzleistung (z. B. die über den Wärmezähler aufsummierte produzierte Wärme) dividiert durch die über den Betrachtungszeitraum aufsummierte zugeführte Leistung (z. B. der Heizwert des verfeuerten Brennstoffs). Wenn die Betrachtung über einen Zeitraum von einem Jahr erfolgt, wird dies als Jahresnutzungsgrad bezeichnet (siehe auch Kapitel 20.12). Wird das Verhältnis von Nutzenergie zu zugeführter Energie über eine kurze Betrachtungsdauer oder als Momentanwert bestimmt, wird dies als Wirkungsgrad bezeichnet (siehe auch Wirkungsgrad).
Polter	Als Polter oder Holzpolter wird in der Forstwirtschaft gestapeltes Rundholz mit gleicher Länge bezeichnet, das auf Sammelplätzen oder in Holzlagern gelagert wird.
Primärseite	Als Primärseite wird bei einer Wärmeübergabestation die Seite des Wärmenetzes, also der mit Fernwärmemedium durchströmte Anlagenteil, bezeichnet. Davon abgeleitet sind die Begriffe primäre Vor- und Rücklauftemperatur für die an der Primärseite (Netzseite) des Wärmeübertragers vorherrschenden Temperaturen. Analog dazu der Begriff Primärdruck (siehe auch Sekundärseite).
Projektbezogenes Qualitätsmanagement (PQM)	Stellt sicher, dass in einem zeitlich begrenzten Projekt, an dem mehrere Unternehmen beteiligt sind, die geforderte Qualität festgelegt und geprüft wird. PQM darf nicht mit dem unternehmensbezogenen Qualitätsmanagement (Zertifizierung nach ISO 9000) und der Prüfung von Warenmustern (Typenprüfung) verwechselt werden. PQM kann aber selbstverständlich im Rahmen von unternehmensbezogenen zertifizierten QM-Systemen von Unternehmen angewendet werden, die am Projekt beteiligt sind. (QM Holzheizwerke ist ein PQM-System; siehe Kapitel 2.1)

Begriffe	Bedeutung
Projektphasen	QM Holzheizwerke unterteilt den Projektablauf in die folgenden 6 Projektphasen: 1. Vorstudien 2. Entwurfsplanung 3. Ausschreibungsplanung 4. Ausschreibung und Vergabe 5. Ausführung und Abnahme 6. Betriebsoptimierung Die Projektphasen von QM Holzheizwerke beschreiben einen typischen Projektablauf, jedoch können die Bezeichnungen und der detaillierte Arbeitsumfang der einzelnen Projektphasen in verschiedenen Ländern/Regionen abweichen. Dazu sind die jeweils länderspezifisch gültigen Normen und Richtlinien zu berücksichtigen.
Q-Beauftragter	Stellt sicher, dass das Qualitätsmanagementsystem «QM Holzheizwerke» etabliert und aufrechterhalten wird. Seine Tätigkeiten sind: Qualitätsplanung, Qualitätslenkung und Qualitätsprüfung.

Begriffe	Bedeutung
QM Holzheizwerke	Projektbezogenes Qualitätsmanagement-System für Holzheizwerke. Im Zentrum stehen die fachgerechte Konzeption, Planung und Realisierung der Wärmeerzeugungsanlage und des Wärmenetzes, um hohe Betriebssicherheit, präzise Regelung, gute lufthygienische Eigenschaften und eine wirtschaftliche Brennstofflogistik sicherzustellen. Das Ziel ist ein energieeffizienter, umweltfreundlicher und wirtschaftlicher Betrieb der gesamten Anlage.
Q-Plan	Der Q-Plan ist das zentrale Dokument von QM Holzheizwerke, in welchem vor der Realisierung der Anlage die Qualitätsforderungen (inkl. Instrumentierung, Messmethode und Toleranz) und die Verantwortlichkeiten festgelegt und im Zuge des weiteren Projektverlaufes regelmässig geprüft und aktualisiert werden. Der Q-Plan besteht aus zwei Dokumenten: • Hauptdokument, erstellt bei der Etablierung von QM Holzheizwerke in Meilenstein 1 • Zusatzdokument, mit einer Excel-Tabelle, das bei Erreichen jedes weiteren Meilensteins von QM Holzheizwerke erstellt wird. Das Zusatzdokument dient der Qualitätsprüfung und Qualitätslenkung während des Projektablaufs (siehe Kapitel 2.3.4).
Qualität	Verhältnis der realisierten Beschaffenheit eines materiellen oder immateriellen Gegenstandes (hier: das Holzheizwerk und das Wärmenetz) zur Qualitätsforderung (in der Regel aus einer Summe von Einzelforderungen bestehend). Gute Qualität bedeutet hier also, dass die realisierte Haustechnikanlage alle im Q-Plan vereinbarten Qualitätsforderungen innerhalb der vereinbarten Toleranzen erfüllt.
Qualitätsforderungen (Q-Forderungen)	Einzelforderungen, die an die Beschaffenheit einer Anlage gestellt werden. In QM Holzheizwerke werden die Qualitätsforderungen an eine Holzheizungsanlage im Q-Plan festgelegt. Die Qualitätsforderungen sind im Q-Leitfaden detailliert formuliert.
Qualitätslenkung (Q-Lenkung)	Festlegung von Massnahmen im Projektablauf, welche sicherstellen, dass Qualitätsabweichungen rechtzeitig erkannt und korrigiert werden.
Qualitätsmanagement (QM)	Umfasst die Methodik und alle Tätigkeiten, welche die Qualitätsforderungen und die Verantwortlichkeiten festlegen und diese durch Qualitätsplanung, Qualitätslenkung und Qualitätsprüfung verwirklichen.
Qualitätsplanung (Q-Planung)	Unmissverständliche Festlegung der Qualitätsforderungen inklusive Verantwortlichkeit, Instrumentierung, Messmethode und Toleranz in einem Q-Plan. Sicherstellen, dass die im Q-Plan aufgeführten Einzelforderungen den anerkannten Regeln der Baukunst und dem aktuellen Stand der Technik entsprechen.
Qualitätsprüfung (Q-Prüfung)	Laufende Prüfung während des Projektablaufs und insbesondere beim Abschluss (Schlussprüfung), ob die im Q-Plan vereinbarten Qualitätsforderungen innerhalb der vereinbarten Toleranz liegen.
Quench	Der Quench ist ein optional integrierbarer Teil einer Rauchgaskondensationsanlage. In einem Quench wird durch Eindüsen von Wasser ein heisser Abgasstrom bis zum Sättigungspunkt abgekühlt. Dadurch kann eine bessere Wärmerückgewinnung (Wärmeübergang) aus dem Abgas erreicht werden. Durch die Sättigung des Abgases ist zudem sichergestellt, dass der nachgeschaltete Kondensator immer nass betrieben wird, um Verschmutzung und Korrosion zu vermeiden. Durch die Wassereindüsung wird zusätzlich Staub aus dem Abgas «ausgewaschen». Quenche sind daher auch Bestandteil von Rauchgaswäschern, wo durch die Eindüsung von Wasser Staub im Abgasstrom gebunden und in nachgeschalteten Tropfenabscheidern (z. B. Zentrifugalabscheider) abgeschieden wird.
Redundanz	Bereitstellung einer zusätzlichen, im Regelbetrieb nicht notwendigen funktionalen Einheit als Ausfallsreserve zur Erhöhung der Betriebssicherheit (z. B. der Einbau einer zweiten baugleichen Pumpe).

Begriffe	Bedeutung
Reisezeit	Als Reisezeit (= Reinigungsintervall) wird bei einer Feuerungs- und Kesselanlage die Betriebsperiode zwischen zwei geplanten Stillständen zum Zweck der (manuellen) Reinigung bezeichnet.
Schlüsselkundinnen/-kunden	Wärmekundinnen oder -kunden mit grossem Wärmeverbrauch, welche signifikant zur Gesamtwärmeabnahme eines Wärmenetzes beitragen und daher von grosser Bedeutung für die Projektentwicklung (Fokus auf potenzielle Schlüsselkundinnen/-kunden – siehe Kapitel 3.2.4), die gesamte Planung und die Dimensionierung des Wärmenetzes und der Erzeugungsanlagen sind.
Schüttraummeter (Srm)	Schüttvolumen des Hackgutes in Kubikmeter (CH: Schnitzelkubikmeter [Sm3])
Sekundärseite	Als Sekundärseite wird bei einer Übergabestation die Gebäudeseite, also der vom Heizmedium der Hausanlage durchströmte Anlagenteil, bezeichnet. Davon abgeleitet sind die Begriffe sekundäre Vor- und Rücklauftemperatur für jene Temperaturen, die an der Sekundärseite (Gebäudeseite) des Wärmeübertragers vorherrschen. Analog dazu der Begriff Sekundärdruck (siehe auch Primärseite).
Situationserfassung	Die Situationserfassung ist eine Analyse der Ist-Situation mit Erfassung des Energie- und Leistungsbedarfs für Wärme (Raumwärme, Warmwasser und Prozesswärme), der baulichen Situation für die Trassenverlegung und des potenziellen Wärmeversorgungsgebietes (siehe Kapitel 11).

Begriffe	Bedeutung
Spitzenlast	Maximaler Wärmeleistungsbedarf, der in der Regel nur kurzzeitig auftritt (z. B. bei sehr niedrigen Aussentemperaturen, Leistungsspitze eines Wärmenetzes am Morgen). Die Spitzenlast einer Anlage ist in der Regel um ein Vielfaches höher als die tägliche oder jährliche Durchschnittsleistung. Die auftretende Spitzenlast hat einen signifikanten Einfluss auf die Anlagenkonfiguration und Dimensionierung aller Anlagenkomponenten. Durch die Integration von Lastausgleichsspeichern kann die effektiv durch die Erzeugungsanlagen bereitzustellende Spitzenlast reduziert werden. Zur Spitzenlastabdeckung werden auch zusätzliche (oft fossile) Spitzenlastkessel eingesetzt. Diese sollten einen breiten Regelbereich aufweisen und schnell zu- und weggeschaltet werden können. Als zusätzliche Redundanz werden der oder die Spitzenlastkessel oft gross ausgelegt, um den Ausfall eines oder mehrerer Grundlastkessel zu kompensieren (Ausfallsreserve).
Standzeit	Unter Standzeit versteht man bei Anlagen, Maschinen oder Werkzeugen die Zeitperiode, in der diese arbeiten können, bis die nächste Wartung, Reinigung oder Ähnliches durchgeführt werden muss. Die Standzeit ist die Zeitdauer, während der die Anlage (Maschine, Werkzeug) ohne Unterbrechung arbeiten kann.
Stoker (Stokerschnecke)	Förderaggregat, mit dem der Brennstoff direkt in den Feuerraum beziehungsweise auf den Verbrennungsrost eingebracht wird. Er ist somit das letzte Glied im Brennstofftransport vom Lager bis zur Feuerung. Der Stoker kann als Schneckenförderer (Stokerschnecke), hydraulischer Einschub oder auch in anderen Bauweisen ausgeführt werden (z. B. Wurf-Beschickung mit Spreader-Stoker). Der Stoker muss für eine gleichmässige Einbringung des Brennstoffes sorgen und spezielle Anforderungen bezüglich Luftabschluss, Rückbrandsicherung und Temperaturbeständigkeit erfüllen.
Stückigkeit	Gibt die Abmessungen und Geometrie von Festbrennstoffen an und ist ein wesentlicher Bestandteil der Charakterisierung von Biomassebrennstoffen. Die Stückigkeit wird entsprechend Brennstoffnormen wie beispielsweise der EN ISO 17225 [23] angegeben.
Tarif (Tarifblatt)	Das Tarifblatt ist Teil des Wärmeliefervertrages und regelt die Preise, Tarife und sonstige Bedingungen für das Erbringen der Wärmelieferung (siehe auch Wärmeliefervertrag).
Technische Anschlussvorschriften TAV	Die Technischen Anschlussvorschriften TAV (auch Technische Anschlussbedingungen TAB) regeln im Idealfall alle technisch relevanten Anschlussbedingungen an ein Fernwärmenetz wie Druck, Temperatur, Material, Messausrüstung, Verrechnung und anderes. Diese gelten bei der Planung, dem Anschluss und Betrieb des Fernwärmenetzes. Die TAV sind Teil des Wärmeliefervertrages (siehe auch Kapitel 8.9.2).
Temperaturspreizung	Differenz zwischen Vor- und Rücklauftemperatur oder Ein- und Austritt eines Apparates. Bei einem Fernwärmenetz interessiert meistens die Temperaturspreizung der Primärseite, also im Fernwärmenetz, bei Wärmeerzeugern zwischen Ein- und Austritt und bei Speichern zwischen oben und unten.
Trasse Trassenlänge Trassenführung	Die Trasse ist der für die Führung der Fernwärmeleitung erforderliche Geländebereich. Die Festlegung der Trassenführung ist Teil der Planung des Fernwärmenetzes und hat signifikanten Einfluss auf die Erschliessung des Versorgungsgebietes und den zukünftigen Netzausbau sowie die Investitionskosten eines Wärmenetzes. Die Trassenlänge ist die Gesamtlänge der Trasse von Haupt-, Zweig- und Hausanschlussleitungen in Metern ([Trm]). Bei je einem Rohr für Vor- und Rücklauf ist die Rohrleitungslänge das Zweifache der Trassenlänge.
Übergabestation (Fernwärme-Übergabestation, Wärmeübergabestation, Hausübergabestation)	Die Übergabestation ist das Bindeglied zwischen der Hausanschlussleitung und der Hauszentrale. Sie dient der vertragsgemässen Übergabe der Wärme und der Messung des Wärmebezuges.

Begriffe	Bedeutung
Umgebungswärme, Umweltwärme	Umgebungswärme oder Umweltwärme ist eine erneuerbare und natürliche und überall verfügbare Energieform, die in der Regel auf relativ tiefem Temperaturniveau vorkommt. Quellen von Umgebungswärme sind die Luft, das obere Erdreich sowie Grund-, See- und Flusswasser. Mit Wärmepumpen kann Umgebungswärme auf ein höheres Temperaturniveau gehoben und nutzbar gemacht werden. Dazu ist die Zufuhr von hochwertiger Energie in Form von Elektrizität oder Hochtemperaturwärme aus einer anderen Quelle erforderlich. Umweltwärme aus tiefer Geothermie oder vulkanischen Ursprungs kann auch direkt nutzbare Wärme auf einem höheren Temperaturniveau bereitstellen.
Vollbetriebsstunden und Vollbetriebsstundenzahl (Volllaststunden)	Die Vollbetriebsstundenzahl ist der Jahresenergiebedarf dividiert durch die Nennwärmeleistung. Sie ist eine wichtige Kenngrösse zur Anlagendimensionierung für einen einzelnen Verbraucher (Vollbetriebsstundenzahl Wärmeabnehmer), einen Kessel oder die gesamte Erzeugung. Eine Vollbetriebsstunde entspricht zum Beispiel einer Stunde Betrieb bei Nennlast oder zwei Betriebsstunden bei 50 % Last und es gilt: Anzahl Vollbetriebsstunden ≤ Anzahl jährlicher Betriebsstunden (siehe jährliche Betriebsstunden).
Vorstudie (Vorplanung, Machbarkeitsstudie)	Frühe Projektphase, in welcher diejenige Projektvariante ermittelt wird, die den gestellten Anforderungen am besten entspricht. Auf Basis der Vorstudie wird über die Weiterführung des Projektes entschieden (Investitionsentscheidung). Die Vorstudie wird je nach Land/Region auch Vorplanung, Machbarkeitsstudie oder Projekt- und Vorbereitungsplanung genannt (siehe auch Kapitel 3.2)

Begriffe	Bedeutung
Wärme-Kraft-Kopplung (Kraft-Wärme-Kopplung)	Energieerzeugungsanlage zur gleichzeitigen Produktion von Wärme und elektrischem Strom. Dazu kommen thermische Maschinen wie zum Beispiel eine ORC-Anlage oder ein Gasmotor zum Einsatz, wobei neben elektrischem Strom auch nutzbare Wärme anfällt. Kompakte Anlagen mit Motoren oder kleinen Gasturbinen werden auch als Blockheizkraftwerke (BHKW) bezeichnet, während thermische Kraftwerke mit Abwärmenutzung als Heizkraftwerke bezeichnet werden (siehe Kapitel 13.6.3).
Wärmebezugsdichte (Wärmedichte, Wärmebedarfsdichte)	Die Wärmebezugsdichte ist der jährliche Wärmebezug aller Gebäude eines Versorgungsgebietes im Verhältnis zur Grundfläche des Versorgungsgebietes (siehe Kapitel 12.2.2).
Wärmeabnehmerin/-abnehmer Wärmebezügerin/-bezüger Wärmekundin/-kunde Wärmeverbraucherin/-verbraucher	An ein Fernwärmenetz angeschlossene Gebäude/Objekte (und deren Eigentümerinnen/Eigentümer), die Wärme vom Wärmenetz oder der Heizzentrale (und somit von einem Wärmeversorgungsunternehmen) gemäss den Vereinbarungen im Wärmeliefervertrag beziehen.
Wärmegestehungskosten	Die Wärmegestehungskosten sind das Verhältnis der Jahreskosten für die Wärmeerzeugung zur jährlich erzeugten Nutzwärme und stellen die spezifischen Produktionskosten für Wärme in CHF/MWh oder €/MWh dar (siehe Kapitel 10.4.2). Die Jahreskosten werden üblicherweise mit der Annuitätenmethode nach VDI 2067 [100] ermittelt und enthalten Kapitalkosten (Annuität aus der Investition), Betriebskosten (Unterhalts-/Wartungs- und Personalkosten), Energiekosten (Brennstoffe und Hilfsenergie) und sonstige Kosten (z. B. Planung).
Wärmeversorgungsunternehmen (Wärmelieferanten)	Unternehmen (Betriebsgesellschaft), das die Wärmeversorgungsanlage (Heizzentrale, Wärmenetz) betreibt und die mittels Wärmeliefervertrag vereinbarte Erbringung der gesicherten Wärmeversorgung an die Wärmeabnehmerinnen/-abnehmer verantwortet.
Wärmeliefervertrag	Im Wärmeliefervertrag ist die Schnittstelle zwischen Wärmeversorgungsunternehmen (Lieferant) und Wärmeabnehmer (Kundin/Kunde) vertraglich vereinbart. Üblicherweise enthält der Wärmeliefervertrag zusätzlich folgende Vertragsbestandteile: Allgemeine Geschäftsbedingungen AGB, Technische Anschlussvorschriften (TAV) und ein Tarifblatt.
Wärmeträgermedium	Das für den Wärmetransport eingesetzte Medium wie Wasser, Dampf oder Thermoöl.
Wärmeübertrager	Ein Wärmeübertrager (veraltet: Wärmetauscher) ist ein Apparat, in dem thermische Energie über Wärmeübertragungsflächen (z. B. Platten oder Rohrbündel) von einem warmen Stoffstrom auf einen anderen, kälteren Stoffstrom übertragen wird.

Begriffe	Bedeutung
Warmwasser	Der Begriff Warmwasser wird in der Gebäudetechnik und in der Fernwärmetechnik unterschiedlich wie folgt verwendet: • In der Fernwärmetechnik beschreibt Warmwasser das Zirkulationswasser im Fernwärmenetz, wenn die Temperatur bis zu 110 °C beträgt, während Zirkulationswasser mit über 110 °C als Heisswasser bezeichnet wird. Warmwasser im Fernwärmenetz muss keine Trinkwasserqualität aufweisen und ist daher nicht zu verwechseln mit Warmwasser in der Gebäudetechnik. • In der Gebäudetechnik steht Warmwasser für erwärmtes Trinkwasser (auch Brauchwarmwasser oder Trinkwarmwasser genannt), das bei rund 60 °C zur Verfügung gestellt wird. Die Erwärmung und Bereitstellung von Trinkwarmwasser erfolgt mit Warmwasserbereitern. Dies kann ein Speicher sein (Speicher-Wassererwärmer, Boiler) oder ein Durchlauferhitzer.
Werkleitungen	Der Begriff umfasst Kanalisations-, Wasser-, Abwasser- und Stromleitungen einer Gemeinde, einer Stadt oder eines Unternehmens.
Wirkungsgrad	Der Wirkungsgrad einer technischen Anlage beschreibt das Verhältnis zwischen Nutzenergie und zugeführter Energie. Bei stationären Bedingungen ohne Verfälschung durch Speichereffekte kann der Wirkungsgrad auch als Verhältnis zwischen Nutzleistung und zugeführter Leistung bestimmt werden. Im vorliegenden Handbuch wird der Begriff des Wirkungsgrades für einen über die Leistungen bestimmten Momentanwert oder einen über eine kurze Betrachtungsdauer ermittelten Wert verwendet. Zur Bewertung des Anlagenbetriebs über einen längeren Betrachtungszeitraum beschreibt der Nutzungsgrad das Verhältnis zwischen der über den Betrachtungszeitraum aufsummierten Nutzleistung und der über den Betrachtungszeitraum aufsummierten zugeführten Leistung (siehe Nutzungsgrad).
Zielwert	Wert, der bei vergleichbaren, erfolgreichen Projekten nachgewiesen wurde. Wenn bei einer Q-Forderung ein Zielwert angegeben wird, bedeutet dies, dass dieser Wert angestrebt werden sollte. Es kann aber gute Gründe geben, um von diesem Zielwert abzuweichen; Abweichungen sollen jedoch begründet werden. (Im Gegensatz dazu darf ein Grenzwert nicht über- oder unterschritten werden.)

22 Literatur

[1] Eurostat, «Energy balances 2018». Zugegriffen: 22. Januar 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/energy-balances

[2] A. Camia, N. E. Cazzaniga, R. Jonsson, und D. Palermo, «Sankey diagrams of woody biomass flows in the EU-28», European Commission's Knowledge Centre for Bioeconomy, Brüssel, Broschüre, 2019. Zugegriffen: 28. Januar 2021. [Online]. Verfügbar unter: http://publications.europa.eu/publication/manifestation_identifier/PUB_KJ0119205ENN

[3] European Commission's Knowledge Centre for Bioeconomy, «Sankey diagrams of woody biomass flows in the EU-28 - Years 2009-2015». European Commission, 2019. Zugegriffen: 28. Januar 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://data.europa.eu/doi/10.2760/227292

[4] N. Scarlat, J.-F. Dallemand, N. Taylor, und M. Banja, «Brief on biomass for energy in the European Union», Publications Office of the European Union, 2019. Zugegriffen: 22. Januar 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/111111111/55047

[5] IEA Data and statistics, «World Energy Balance 2018», IEA. Zugegriffen: 22. Januar 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tables

[6] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, «World Population Prospects: The 2017 Revision, Data Booklet», Department of Economic and Social Affairs, Population Division, ST/ESA/SER.A/401, 2017. Zugegriffen: 22. Januar 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2017_DataBooklet.pdf

[7] R. Palen, «First population estimates - EU population up to nearly 513 million on 1 January 2018 - Increase driven by migration», Eurostat, Brüssel, Newsrelease 115/2018, Juli 2018. Zugegriffen: 22. Januar 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/energy-balances

[8] U. Kaufmann, «Schweizerische Statistik der erneuerbaren Energien», Bundesamt für Energie, Bern, Ausgabe 2018, Sep. 2019. Zugegriffen: 28. Januar 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/statistik-und-geodaten/energiestatistiken/teilstatistiken.exturl.html/aHR0cHM6Ly9wdWJkYi5iZmUuYWRtaW4uY2gvZGUvcHVibGljYX/Rpb24vZG93bmxvYWQvOTgyOQ==.html

[9] International Renewable Energy Agency IRENA, «Renewable Energy and Jobs – Annual Review 2019», International Renewable Energy Agency IRENA, Abu Dhabi, 2019. Zugegriffen: 22. Januar 2021. [Online]. Verfügbar unter: /publications/2019/Jun/Renewable-Energy-and-Jobs-Annual-Review-2019

[10] Observ'ER, «The state of Renewable Energies in Europe - 19th EurObserv'ER Report». Zugegriffen: 22. Januar 2021. [Online]. Verfügbar unter: http://www.energies-renouvelables.org/

[11] A. P. C. Faaij, «Securing sustainable resource availability of biomass for energy applications in Europe; review of recent literature», University of Groningen, Groningen, Fachartikel, 2018. Zugegriffen: 22. Januar 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://energy.nl/wp-content/uploads/2019/06/Bio-energy-Europe-EU-Biomass-Resources-Andr%C3%A9-Faaij-Final.pdf

[12] M. Banja, R. Sikkema, M. Jégard, V. Motola, und J.-F. Dallemand, «Biomass for energy in the EU – The support framework», *Energy Policy*, Bd. 131, S. 215–228, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.enpol.2019.04.038.

[13] Directorate-General for Energy (European Commission), Trinomics, T. Badouard, und M. Altman, *Energy subsidies: energy costs, taxes and the impact of government interventions on investments: final report*. Luxemburg: Publications Office of the European Union, 2020. Zugegriffen: 29. September 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://data.europa.eu/doi/10.2833/546611

[14] Europäischer Rechnungshof, Hrsg., *Wurden mit den Mitteln aus den Fonds der Kohäsionspolitik zur Förderung der Erzeugung erneuerbarer Energien gute Ergebnisse erzielt? gemäß Artikel 287 Absatz 4 Unterabsatz 2 AEUV*. in Sonderbericht / Europäischer Rechnungshof, no. 2014,6. Luxemburg: Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union, 2014.

[15] R. Bühler, H. R. Gabathuler, und A. Jenni, *Q-Leitfaden QMstandard*, 3. erweiterte Auflage, Bd. 1, 6 Bd. in Schriftenreihe QM Holzheizwerke, vol. 1. Straubing: C.A.R.M.E.N. e.V., 2011. [Online]. Verfügbar unter: https://www.qmholzheizwerke.ch/publikationen.html

[16] S. Thalmann, *Erneuerung Holzenergieanlagen*. (März 2020). ger. Holzenergie Schweiz und ARGE QM Holzheizwerke, Zürich. [Excel]. Verfügbar unter: https://www.qmholzheizwerke.ch/de/downloads.html

[17] ARGE QM Holzheizwerke, «QM Holzheizwerke», QM Holzheizwerke. Zugegriffen: 9. Dezember 2019. [Online]. Verfügbar unter: https://www.qmholzheizwerke.ch/de/home.html

[18] B. Meier, C. Moser, C. Vogler, und R. Dettli, «Sozioökonomische Aspekte thermischer Netze», econcept AG, Zürich, Schlussbericht, Apr. 2019. Zugegriffen: 18. März 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.econcept.ch/de/projekte/soziookonomische-aspekte-thermischer-netze/

[19] T. Nussbaumer, S. Thalmann, A. Jenni, und J. Ködel, *Planungshandbuch Fernwärme*, Version 1.2. Zürich: Verenum Dr. Thomas Nussbaumer, 2018. [Online]. Verfügbar unter: http://www.verenum.ch/Planungshandbuch_QMFW.html

[20] L. Küng, P. Kräuchi, und G. Kayser, «Risiken bei thermischen Netzen», BG Ingenieure und Berater AG, Bern, Schlussbericht, Apr. 2018. [Online]. Verfügbar unter: https://www.energieschweiz.ch/de-ch/home.aspx?p=22949,22963,22984,22985

[21] H. Thorwarth, H. Gerlach, L. Rieger, M. Schroth, R. Krichhof, und J. Tejada, «Natürliche Einflüsse auf die Qualität von Holzbrennstoffen und deren Auswirkungen auf den Betrieb von Holz-Heizkraftwerken», *VGB PowerTech J. 112018*, 2018, Zugegriffen: 21. April 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.vgb.org/pt_11_18.html

[22] «DIN EN ISO 16993:2016-11, Biogene Festbrennstoffe - Umwandlung von Analysenergebnissen einer Bezugsbasis in Ergebnisse mit anderer Bezugsbasis (ISO 16993:2016); Deutsche Fassung EN ISO 16993:2016», Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/2555895.

[23] «DIN EN ISO 17225-1:2014-09, Biogene Festbrennstoffe - Brennstoffspezifikationen und -klassen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen (ISO 17225-1:2014); Deutsche Fassung EN ISO 17225-1:2014», Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/2073606.

[24] «DIN EN ISO 18125:2017-08, Biogene Festbrennstoffe - Bestimmung des Heizwertes (ISO 18125:2017); Deutsche Fassung EN ISO 18125:2017», Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/2603463.

[25] J. Hahn, M. Schardt, F. Schulmeyer, und F. Mergler, «Energieinhalt von Holz», Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), Freising, Merkblatt 12, 2014. Zugegriffen: 21. April 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.lwf.bayern.de/service/publikationen/lwf_merkblatt/022952/index.php

[26] F. Kollmann, «Holz und Feuchtigkeit Teil 2: Freies Wasser, Schwinden und Quellen, Eigenschaftsänderungen, Holzfeuchtigkeit und Schädlinge, Heizwert», *Holz-Zentralblatt*, S. 1428–1429, 1982.

[27] M. Kaltschmitt, H. Hartmann, und H. Hofbauer, Hrsg., *Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren*, 3., aktualisierte und erweiterte Auflage. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, 2016.

[28] «DIN EN ISO 17827-1:2016-10, Biogene Festbrennstoffe - Bestimmung der Partikelgrößenverteilung für unkomprimierte Brennstoffe - Teil 1: Horizontales Rüttelsiebverfahren mit Sieben mit einer Lochgröße von 3,15 mm und darüber (ISO 17827-1:2016); Deutsche Fassung EN ISO 17827-1:2016», Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/2360044.

[29] D. Kuptz, E. Dietz, K. Schreiber, C. Schön, R. Mack, und H. Hartmann, *Holzhackschnitzel aus dem Kurzumtrieb - Brennstoffqualität und Verbrennungsverhalten*. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 2018. Zugegriffen: 21. April 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.tfz.bayern.de/service/presse/186025/index.php

[30] M. Kern, T. Raussen, K. Funda, A. Lootsma, und H. Hofmann, *Aufwand und Nutzen einer optimierten Bioabfallverwertung hinsichtlich Energieeffizienz, Klima- und Ressourcenschutz*. in Texte, no. 43/2010. Dessau-Rosslau: Umweltbundesamt, 2010. Zugegriffen: 21. April 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/aufwand-nutzen-einer-optimierten

[31] L. Eltrop und Universität Stuttgart, Hrsg., *Leitfaden feste Biobrennstoffe: Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen im mittleren und großen Leistungsbereich*, 4., vollst. überarb. Aufl. Gülzow-Prüzen: FNR, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., 2014.

[32] H. Thorwarth, M. Wöhler, und S. Rieder, «Influence of Road Salt on Chemical Properties of Road Side Biomass», gehalten auf der 25th European Biomass Conference and Exhibition, Stockholm, 12. Juni 2017.

[33] H. Thorwarth und M. Scheuber, «Die Qualität bestimmt die Grenzen der Kaskadennutzung von Altholz», *MÜLL ABFALL*, Nr. 3, S. 6, März 2020, doi: 10.37307/j.1863-9763.2020.03.06.

[34] Publications Office of the European Union, *Beschluss der Kommission vom 18. Dezember 2014 zur Änderung der Entscheidung 2000/532/EG über ein Abfallverzeichnis gemäß der Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates Text von Bedeutung für den EWR*. Publications Office of the European Union, 2014. Zugegriffen: 21. April 2021. [Online]. Verfügbar unter: http://op.europa.eu/es/publication-detail/-/publication/bb120f99-8ff5-11e4-b8a5-01aa75ed71a1/language-de/format-PDFA1A

[35] Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK), *Verordnung des UVEK über Listen zum Verkehr mit Abfällen*. 2005. Zugegriffen: 21. April 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2005/714/de

[36] Schweizerische Eidgenossenschaft, *Luftreinhalte-Verordnung (LRV)*, Bd. 814.318.142.1. 1985, S. 96. Zugegriffen: 12. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.admin.ch/opc/de/classified-compilation/19850321/index.html

[37] N. Hofmann, T. Mendel, D. Kuptz, F. Schulmeyer, H. Borchert, und H. Hartmann, *Lagerung von Holzhackschnitzeln - Trockenmasseverluste, Änderungen der Brennstoffqualität und Kosten*. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 2017. Zugegriffen: 21. April 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.tfz.bayern.de/service/presse/186025/index.php

[38] W. Becke, C. Fink, M. Hamilton-Jones, R. Pertschy, und C. Rohringer, «Monitoring-Ergebnisse von grossen Solarthermie-Anlagen für Trocknungsanwendungen», in *Tagungsunterlagen Online-Symposium Solarthermie und Innovative Wärmesysteme*, Connexio GmbH, Hrsg., Connexio GmbH, 2021, S. 196–207.

[39] W. Emhofer, «Emissions from wood pellets during storage», Thesis, 2015. Zugegriffen: 21. April 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://repositum.tuwien.at/handle/20.500.12708/3701

[40] «Phyllis2 - Database for the physico-chemical composition of (treated) lignocellulosic biomass, micro- and macroalgae, various feedstocks for biogas production and biochar». Zugegriffen: 21. April 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://phyllis.nl/

[41] «FRED - Feste Regenerative Energieträger Datenbank». Zugegriffen: 21. April 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.fred.bayern.de/

[42] H. Thorwarth, «Validierung und Automatisierung der Brennstoffanalytik in einem Heizwerk», gehalten auf dem 16. Fachkongress Holzenergie, Augsburg, 2016.

[43] L. Lasselsberger, *Kleinfeuerungen für Holz – Verbrennungstechnik/Stand der Technik/Regelwerke/Entwicklung*. Wieselburg: Bundesanstalt für Landtechnik, 2000.

[44] D. Kuptz, F. Schulmeyer, K. Hüttl, E. Dietz, H. Borchert, und H. Hartmann, *Optimale Bereitstellungsverfahren für Holzhackschnitzel*. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum

für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 2015. Zugegriffen: 21. April 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.tfz.bayern.de/service/presse/186025/index.php

[45] «DIN EN ISO 18134-1:2015-12, Biogene Festbrennstoffe - Bestimmung des Wassergehaltes - Ofentrocknung - Teil 1: Gesamtgehalt an Wasser - Referenzverfahren (ISO 18134-1:2015); Deutsche Fassung EN ISO 18134-1:2015», Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/2311530.

[46] «DIN EN ISO 18134-2:2017-05, Biogene Festbrennstoffe - Bestimmung des Wassergehaltes - Ofentrocknung - Teil 2: Gesamtgehalt an Wasser - Vereinfachtes Verfahren (ISO 18134-2:2017); Deutsche Fassung EN ISO 18134-2:2017», Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/2637759.

[47] T. Mendel, D. Kuptz, A. Überreiter, und H. Hartmann, *Schnellbestimmung des Wassergehalts von Holzhackschnitzeln*. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 2017. Zugegriffen: 21. April 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.tfz.bayern.de/service/presse/186025/index.php

[48] «DIN EN ISO 18122:2016-03, Biogene Festbrennstoffe - Bestimmung des Aschegehaltes (ISO 18122:2015); Deutsche Fassung EN ISO 18122:2015», Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/2316155.

[49] C.A.R.M.E.N. e.V., «Marktpreise Hackschnitzel». Zugegriffen: 21. April 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.carmen-ev.de/service/marktueberblick/marktpreise-energieholz/marktpreise-hackschnitzel/

[50] M. Mladenović, M. Paprika, und A. Marinković, «Denitrification techniques for biomass combustion», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Bd. 82, S. 3350–3364, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.10.054.

[51] S. Van Loo und J. Koppejan, Hrsg., *The handbook of biomass combustion and co-firing*. London ; Washington, DC: Earthscan, 2010.

[52] I. Obernberger, *Nutzung fester Biomasse in Verbrennungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung des Verhaltens aschebildender Elemente*. Graz: dbv-Verlag der Technischen Universität Graz, 1997. Zugegriffen: 15. April 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://graz.pure.elsevier.com/en/publications/nutzung-fester-biomasse-in-verbrennungsanlagen-unter-besonderer-b

[53] A. Lauber und T. Nussbaumer, «Praxiseinsatz und Überwachung von automatischen Holzfeuerungen mit Elektroabscheider», Verenum im Auftrag Bundesamt für Energie, Bern, Schlussbericht, Dez. 2014.

[54] T. Nussbaumer, «Schadstoffbildung bei der Verbrennung von Holz», Doctoral Thesis, ETH Zurich, 1989. doi: 10.3929/ethz-a-000514834.

[55] R. Keller, «Primärmassnahmen zur NOx-Minderung bei der Holzverbrennung mit dem Schwerpunkt der Luftstufung», Doctoral Thesis, ETH Zurich, 1994. doi: 10.3929/ethz-a-000945058.

[56] R. Salzmann und T. Nussbaumer, «Fuel Staging for NO x Reduction in Biomass Combustion: Experiments and Modeling», *Energy Fuels - ENERG FUEL*, Bd. 15, Mai 2001, doi: 10.1021/ef0001383.

[57] T. Nussbaumer, «Primär- und Sekundärmassnahmen zur Stickoxidminderung bei Holzfeuerungen», in *Moderne Feuerungstechnik zur energetischen Verwertung von Holz und Holzabfällen: Emissionsminderung, Konzepte und ausgeführte Anlagen*, in Moderne Feuerungstechnik zur energetischen Verwertung von Holz und Holzabfällen, Emissionsminderung, Konzepte und ausgeführte Anlagen, Sonderpublikation, Düsseldorf: Springer-VDI-Verl, 1997, S. 279–308.

[58] H. Fastenaekels und T. Nussbaumer, «Entwicklung einer kombinierten Unterschub- und Einblasfeuerung zur Luft- und Brennstoffstufung», in *Luftreinhaltung und Explosionsschutz bei Holzfeuerungen und Stand der Technik der Holzvergasung*, T. Nussbaumer, Hrsg., in 7. Holzenergie-Symposium, Zürich: Bundesamt für Energie BfE, 2002, S. 89–102.

[59] C. Jirkowsky, R. Pretzl, T. Malzer, und K. Sihorsch, «Grundlagen der Staubabscheidung für Biomassefeuerungen ab 100 kW», in *Luftreinhaltung und Explosionsschutz bei Holzfeuerungen und Stand der Technik der Holzvergasung*, T. Nussbaumer, Hrsg., in 7. Holzenergie-Symposium, Zürich: Bundesamt für Energie BfE, 2002, S. 53–72.

[60] J. Good und T. Nussbaumer, «Wirkungsgradbestimmung bei Holzfeuerungen», Verenum im Auftrag Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern, Schlussbericht, 1993.

[61] «DIN IEC 60050-351:2014-09, Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch - Teil 351: Leittechnik (IEC 60050-351:2013)», Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/2159569.

[62] H. R. Gabathuler und H. Mayer, *Standard-Schaltungen Teil I QM Holzheizwerke*, 2. erweiterte Auflage, Bd. 2, 5 Bd. in Schriftenreihe QM Holzheizwerke, vol. 2. Straubing: C.A.R.M.E.N. e.V., 2010.

[63] H. Lutz und W. Wendt, *Taschenbuch der Regelungstechnik mit MATLAB und Simulink*. Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel, 2019.

[64] W. Böge und W. Plaßmann, Hrsg., «Grundlagen und Grundbegriffe der Meßtechnik», in *Vieweg Handbuch Elektrotechnik: Grundlagen und Anwendungen für Elektrotechniker*, Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2007, S. 735–740. doi: 10.1007/978-3-8348-9217-1_57.

[65] «DIN EN 61131-1:2004-03, Speicherprogrammierbare Steuerungen - Teil 1: Allgemeine Informationen (IEC 61131-1:2003); Deutsche Fassung EN 61131-1:2003», Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/9537680.

[66] «DIN EN 12953-6:2011-05, Großwasserraumkessel - Teil 6: Anforderungen an die Ausrüstung für den Kessel; Deutsche Fassung EN 12953-6:2011», Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/1719251.

[67] Deutscher Energieholz- und Pellet-Verband e.V. (DEPV) und Deutsches Pelletinstitut GmbH, Hrsg., *Lagerung von Holzpellets - ENplus-konforme Lagersysteme*, 5. überarbeitete Auflage. Berlin: Deutscher Energieholz- und Pellet-Verband e.V. (DEPV), 2019. Zugegriffen: 4. Juni 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://depv.de/p/Broschure-Lagerung-von-Holzpellets-ENplus-konforme-Lagersysteme-hienxHo3uXFMhgnQNTNyMc

[68] J. Good *u. a.*, *Planungshandbuch QM Holzheizwerke*, 2. leicht überarbeitete Auflage, Bd. 4, 5 Bd.

in Schriftenreihe QM Holzheizwerke, vol. 4. Straubing: C.A.R.M.E.N. e.V., 2008.

[69] Berufsgenossenschaft Holz und Metall (BGHM), «Absauganlagen und Silos für Holzstaub und -späne - Brand- und Explosionsschutz», Berufsgenossenschaft Holz und Metall (BGHM), Mainz, BGI 739-2, Juli 2012. Zugegriffen: 19. November 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://publikationen.dguv.de/regelwerk/dguv-informationen/2832/absauganlagen-und-silos-fuer-holzstaub-und-spaene

[70] Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen VKF, Hrsg., *Brandschutzerläuterung Spänefeuerungen 104-15*. in Erläuterungen. Bern: Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen VKF, 2015. Zugegriffen: 5. Mai 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://services.vkg.ch/rest/public/georg/bs/publikation/documents/BSPUB-1394520214-157.pdf/content

[71] A. Hammerschmid und A. Stallinger, *Standard-Schaltungen Teil II QM Holzheizwerke*, 1. Auflage, Bd. 5, 5 Bd. in Schriftenreihe QM Holzheizwerke, vol. 5. Straubing: C.A.R.M.E.N. e.V., 2006.

[72] C. U. Brunner, J. Nipkow, P. Gyger, und T. Staubli, «Pumpen - Die wichtigsten Fakten zur Auswahl und zum Einsatz von Förderpumpen», Topmotors, Zürich, 2012. Zugegriffen: 19. Juli 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.topmotors.ch/sites/default/files/2018-08/D_MB_23_Pumpen.pdf

[73] «FW 218 - Planung, Bau und Abnahme von Messstellen für thermische Energie», AGFW - Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V., März 2020. Zugegriffen: 21. Oktober 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.agfw-shop.de/regelwerk/2-warmemessung-und-abrechnung/fw-218c-entwurf-einbau-und-abnahme-von-messgeraeten-fuer-thermische-energie-druckfassung.html

[74] «FW 510 - Anforderungen an das Kreislaufwasser von Industrie- und Fernwärmeheizanlagen sowie Hinweise für deren Betrieb», AGFW-Projektgesellschaft für Rationalisierung, Information und Standardisierung GmbH, Frankfurt am Main, Arbeitsblatt, 2013. [Online]. Verfügbar unter: https://www.agfw.de/regelwerk/

[75] «Wasserbeschaffenheit für Gebäudetechnik-Anlagen», Schweizerischer Verein von Gebäudetechnik-Ingenieuren SWKI, Urtenen-Schönbühl, Richtlinie BT102-01, 2012. Zugegriffen: 15. April 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://shop.snv.ch/Technische-Regel/Diverses/SWKI-BT102-01/SICC-BT102-01.html?listtype=search&searchparam=BT102-01%20

[76] S. Thalmann, S. Mennel, A. Jenni, und T. Nussbaumer, *Leitfaden zur Planung von Fernwärme-Übergabestationen*, Version 1.0. Zürich: Verenum AG, 2020. [Online]. Verfügbar unter: http://www.verenum.ch/Dokumente_QMFW.html

[77] S. Frederiksen und S. Werner, *District heating and cooling*, 1. Auflage. Lund: Studentlitteratur, 2013.

[78] H. Ernst, *Technisches Handbuch Fernwärme*, 3. Aufl. in Technik und Normung. Frankfurt am Main: AGFW, 2013.

[79] «FW 515 - Technische Anschlussbedingungen Heizwasser (TAB-HW)», AGFW-Projektgesellschaft für Rationalisierung, Information und Standardisierung GmbH, Frankfurt am Main, Merkblatt, 2015. [Online]. Verfügbar unter: https://www.agfw.de/regelwerk/

[80] M. Meyer, «Verwertung von Biomasseaschen als wertvoller Dünger für die Land- und Forstwirtschaft», Biomasseverband OÖ, Linz, 2014.

[81] I. Obernberger, «Aschen aus Biomassefeuerungen - Charakterisierung, Aufbereitung und Verwendungsmöglichkeiten», gehalten auf dem 2. Fachgespräch zur Verwertung naturbelassener Biomasseaschen, Jena, 2020.

[82] «Markt für Holzasche befindet sich im Entstehen», Holz-Zentralblatt, Zeitungsartikel, Nov. 2015.

[83] M. Jutz, M. Tobler, A. Keel, und U. Rhyner, «Projekt HARVE - Holzaschen in der Schweiz: Aufkommen, Verwertung und Entsorgung», Holzenergie Schweiz, Bern, PP-Präsentation, 2020.

[84] I. Obernberger, «Aschen aus Biomassefeuerungen - Zusammensetzung und Verwertung», in *Thermische Biomassenutzung: Technik und Realisierung; Tagung Salzburg, 23. und 24. April 1997*, Gesellschaft Energietechnik, Hrsg., in VDI-Berichte, no. 1319, Düsseldorf: VDI-Verl, 1997, S. 199–222.

[85] A. Keel, «Auswertung Analyseberichte Holzaschen - unveröffentlicht». Holzenergie Schweiz, 2020.

[86] R. Zürcher, «Entsorgung von Aschen und Filterstäuben aus Holzfeuerungen im Kanton Bern», Fachhochschule Nordwestschweiz Windisch, Masterthesis MAS, 2016.

[87] B. Müller, «Einfluss von Brennstoff und Anlagenbetrieb auf die Aschequalität», gehalten auf der 1. Schweizer Holzaschen Fachtagung, Eschenz, 12. November 2020.

[88] A. Keel, «Etablierung der Deponierung von Holzaschen nach VVEA und Ansätze zur Verwertung», gehalten auf dem 15. Holzenergie-Symposium, ETH Zürich, 14. September 2018.

[89] Schweizerische Eidgenossenschaft, *Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (Abfallverordnung, VVEA)*, Bd. SR 814.600. 2015, S. 50. Zugegriffen: 16. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2015/891/de

[90] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz und Bundesamt für Justiz, *Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnis-Verordnung - AVV)*. 2001, S. 32. [Online]. Verfügbar unter: http://www.gesetze-im-internet.de/avv/BJNR337910001.html

[91] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz und Bundesamt für Justiz, *Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (KrWG)*. 2012, S. 54. [Online]. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/krwg/BJNR021210012.html

[92] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz und Bundesamt für Justiz, *Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden (Bioabfallverordnung - BioAbfV)*. 1998, S. 58. [Online]. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/bioabfv/BJNR295500998.html

[93] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz und Bundesamt für Justiz, *Verordnung über*

Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung - DepV). 2009, S. 64. [Online]. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/depv_2009/BJNR090010009.html

[94] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz und Bundesamt für Justiz, *Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung - DüMV)*. 2012, S. 117. [Online]. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/d_mv_2012/BJNR248200012.html

[95] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz und Bundesamt für Justiz, *Düngegesetz (DüngG)*. 2009, S. 13. [Online]. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/d_ngg/BJNR005400009.html

[96] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz und Bundesamt für Justiz, *Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung - DüV)*. 2017, S. 46. [Online]. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/d_v_2017/BJNR130510017.html

[97] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz und Bundesamt für Justiz, *Verordnung über die Nachweisführung bei der Entsorgung von Abfällen (Nachweisverordnung - NachwV)*. 2006, S. 22. [Online]. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/nachwv_2007/BJNR229810006.html

[98] H. Reisinger, B. Winter, I. Szednyj, S. Böhmer, und T. Janhsen, *Abfallvermeidung und -verwertung. Aschen, Schlacken und Stäube in Österreich*, Bd. 0003. in Report, vol. 0003. Wien: Umweltbundesamt GmbH i. A. des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 2005. Zugegriffen: 9. April 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.at/studien-reports/publikationsdetail?pub_id=1581&cHash=38c7041b49115f2560a5558691a1a86c

[99] H. Holzner, I. Obernberger, und K. Katzensteiner, *Richtlinie für den sachgerechten Einsatz von Pflanzenaschen zur Verwertung auf land- und forstwirtschaftlich genutzten Flächen*, 1. Auflage. Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 2011.

[100] VDI-Fachbereich Technische Gebäudeausrüstung, *VDI 2067 Blatt 1 - Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung*. Düsseldorf: VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V., 2012. Zugegriffen: 18. November 2019. [Online]. Verfügbar unter: https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-2067-blatt-1-wirtschaftlichkeit-gebaeudetechnischer-anlagen-grundlagen-und-kostenberechnung-1

[101] «ÖKL-Merkblatt 67 Planung von Biomasseheizwerken und Nahwärmenetzen», Österreichisches Kuratorium für Landtechnik und Landentwicklung (ÖKL), Wien, 3. Auflage, 2016. Zugegriffen: 18. März 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://oekl.at/publikationen/merkblaetter/mb67/

[102] R. Leemann, «Methoden der Wirtschaftlichkeitsanalyse von Energiesystemen». RAVEL, 1992. Zugegriffen: 12. November 2019. [Online]. Verfügbar unter: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=9&ved=2ahUKEwixyPSEueXlAhWOZMAKHWBjD-QQFjAIegQIARAC&url=https%3A%2F%2Fwww.energie.ch%2Fbfk%2Fravel%2F12_51_2D.pdf&usg=AOvVaw1eBPjpV0hul1wKlY-Wp-MG

[103] C.A.R.M.E.N. e.V., *SOPHENA – Software zur Planung von Heizwerken und Nahwärmenetzen*. GreenDelta GmbH. Zugegriffen: 18. Juni 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.carmen-ev.de/service/sophena/

[104] J.-P. Thommen, *Betriebswirtschaft und Management: Eine managementorientierte Betriebswirtschaftslehre*, 10., überarbeitete und erweiterte Auflage. Zürich: Versus, 2016.

[105] AGFW - Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V., «AVBFernwärmeV», Energiewirtschaft, Recht & Politik / Recht / AVBFernwärmeV. Zugegriffen: 26. November 2019. [Online]. Verfügbar unter: https://www.agfw.de/energiewirtschaft-recht-politik/recht/avbfernwaermev/

[106] «Effiziente Heizwerke, klimaaktiv». Zugegriffen: 24. November 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.klimaaktiv.at/erneuerbare/effiziente_heizwerke.html

[107] S. Thalmann, *THENA*. (Juli 2019). ger. Verenum Dr. Thomas Nussbaumer und ARGE QM Fernwärme, Zürich. [Excel]. Verfügbar unter: http://www.verenum.ch/Planungshandbuch_QMFW.html

[108] S. Thalmann, *DN-Sensi*. (März 2021). ger. Verenum AG und ARGE QM Fernwärme, Zürich. [Excel]. Verfügbar unter: http://www.verenum.ch/Dokumente/FW_Tool_DN-Sensi_V1.3.xlsx

[109] ARGE QM Fernwärme, «QM Fernwärme», QM Fernwärme. Zugegriffen: 9. Dezember 2019. [Online]. Verfügbar unter: http://www.verenum.ch/index_QMFW.html

[110] QM Holzheizwerke, «Excel-Tabelle Situationserfassung QM Holzheizwerke», QM Holzheizwerke. Zugegriffen: 31. Dezember 2019. [Online]. Verfügbar unter: https://www.qmholzheizwerke.ch/de/situationserfassung.html

[111] M. Peters, T. Steidle, und H. Böhmisch, *Kommunale Wärmeplanung - Handlungsleitfaden*, [Auflage prüfen] Stuttgart: KEA Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg GmbH, 2020. Zugegriffen: 19. März 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/2_Presse_und_Service/Publikationen/Energie/Leitfaden-Kommunale-Waermeplanung-barrierefrei.pdf

[112] P. für S. EnergieSchweiz Gemeinden, Areale und Regionen, «Räumliche Energieplanung», Local Energy. Zugegriffen: 19. März 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.local-energy.swiss/infobox/raeumliche-energieplanung.html

[113] «Pan-European Thermal Atlas PETA 5.1». Zugegriffen: 24. November 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://euf.maps.arcgis.com/apps/webapp-

viewer/index.html?id=8d51f3708ea54fb9b732ba0c94409133

[114] «THERMOS Tool», THERMOS. Zugegriffen: 24. November 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.thermos-project.eu/thermos-tool/tool-access/

[115] «Hotmaps Toolbox». Zugegriffen: 24. November 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.hotmaps.eu/map

[116] Schweizerische Eidgenossenschaft, «Swiss Geoportal, Wärme- und Kältenachfrage von Industrie, Wohnen und Dienstleistungen sowie bestehende thermische Netze», geo.admin.ch. Zugegriffen: 8. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://map.geo.admin.ch/#/map?lang=de&center=2623787.44,1221298.25&z=1.514&bgLayer=ch.swisstopo.pixelkarte-farbe&topic=ech&swisssearch=W%C3%A4rme-/K%C3%A4ltenachfrage+Industrie&layers=ch.swisstopo.zeitreihen@year=1864,f;ch.bfs.gebaeude_wohnungs_register,f;ch.bav.haltestellen-oev,f;ch.swisstopo.swisstlm3d-wanderwege,f;ch.vbs.schiessanzeigen,f;ch.astra.wanderland-sperrungen_umleitungen,f;ch.bfe.thermische-netze;ch.bfe.fernwaerme-nachfrage_wohn_dienstleistungsgebaeude;ch.bfe.fernwaerme-nachfrage_industrie

[117] «webGIS Datenbank VFS». Zugegriffen: 24. November 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.fernwaerme-schweiz.ch/fernwaerme-deutsch/Dienstleistungen/webGIS.php

[118] «Heat Roadmap Europe». Zugegriffen: 24. November 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://heatroadmap.eu/

[119] «EN ISO 52016-1:2018-04: Energetische Bewertung von Gebäuden - Energiebedarf für Heizung und Kühlung, Innentemperaturen sowie fühlbare und latente Heizlasten - Teil 1: Berechnungsverfahren (ISO 52016-1:2017) Deutsche Fassung EN ISO 52016-1:2017; Schweizerische Fassung SN EN ISO 52016-1 * SIA 380.211», Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/2577376.

[120] «EN 12831-1:2017-09: Energetische Bewertung von Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast - Teil 1: Raumheizlast, Modul M3-3; Deutsche Fassung EN 12831-1:2017; Schweizerische Fassung SN EN 12831-3 * SIA 385.203», Beuth Verlag GmbH.

[121] T. Nussbaumer, «NOX Reduction in Biomass Combustion. Biomass for Energy and Industry», in *10th European Conference and Technology Exhibition*, Würzburg, Juni 1998, S. 1318–1321.

[122] S. Thalmann, T. Nussbaumer, J. Good, und A. Jenni, «Analyse und Optimierung von Fernwärmenetzen – Ist-Analyse von Fernwärmenetzen und Bewertungs-Tool zur Netz-Optimierung», Bundesamt für Energie BfE, Zürich, Schlussbericht, 2013.

[123] «HSLU Software Tools», Hochschule Luzern. Zugegriffen: 24. November 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.hslu.ch/de-ch/technik-architektur/ueber-uns/organisation/kompetenzzentren-und-forschungsgruppen/bau/gebaeudetechnik-und-energie/software-tools/

[124] «Stanet Netzberechnung», STANET. Zugegriffen: 24. November 2021. [Online]. Verfügbar unter: http://stafu.de/de/home.html

[125] «ROKA^3 Rohrnetzberechnungssoftware für Gas, Wasser und Fernwärme». Zugegriffen: 24. November 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.roka3.de/#

[126] I. Kropp, «SIR 3S – 3S Consult GmbH». Zugegriffen: 24. November 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.3sconsult.de/software/sir-3s/

[127] «Fernwärme in Kürze», Hochschule Luzern Technik und Architektur, Horw, März 2019. [Online]. Verfügbar unter: https://www.endk.ch/de/ablage/energieberatung/Merkblatt%20Fernwaerme%20in%20Kuerze%2020190502_d.pdf

[128] J. Ködel und D. Hanggartner, «Fallbeispiele ‹Thermische Netze›», Hochschule Luzern, Horw, Zusammenfassung, Feb. 2018.

[129] H. Averfalk *u. a.*, *Low-temperature district heating implementation guidebook. Annex TS2 Implementation of low-temperature district heating systems*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2021.

[130] Bundesamt für Umwelt BAFU, «Faktenblatt Emissionsfaktoren Feuerungen». Juni 2015. Zugegriffen: 18. Mai 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/luft/fachinfo-daten/faktenblatt_emissionsfaktorenfeuerungen.pdf.download.pdf/faktenblatt_emissionsfaktorenfeuerungen.pdf

[131] Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren KBOB, «Ökobilanzdaten im Baubereich 2009/1:2016». Januar 2016. Zugegriffen: 18. Mai 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.kbob.admin.ch/kbob/de/home/themen-leistungen/nachhaltiges-bauen/oekobilanzdaten_baubereich.html

[132] T. Nussbaumer, «Erntefaktor von Energiesystemen mit Holzverbrennung», in *Wege zur Nachhaltigkeit und Massnahmen zur Emissionsminderung und Wirtschaftlichkeitsverbesserung*, T. Nussbaumer, Hrsg., in 8. Holzenergie-Symposium, Zürich: Bundesamt für Energie BfE, 2004, S. 7–27.

[133] F. Kessler, N. Knechtle, und R. Frischknecht, «Heizenergie aus Heizöl, Erdgas oder Holz», Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, 315, 2000.

[134] L. Krebs und R. Frischknecht, «Life Cycle Assessment of GO based Electricity Mixes of European Countries 2018», treeze Ltd., Uster, Apr. 2021. Zugegriffen: 18. Mai 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://treeze.ch/projects/case-studies/energy/swiss-electricity-mixes

[135] C. Arpagaus, *Hochtemperatur-Wärmepumpen: Marktübersicht, Stand der Technik und Anwendungspotenziale*. Berlin Offenbach: VDE Verlag GmbH, 2019.

[136] Schweizerischer Bundesrat, *Verordnung zur Reduktion von Risiken beim Umgang mit bestimmten besonders gefährlichen Stoffen, Zubereitungen und Gegenständen (Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung, ChemRRV)*. 2005. [Online]. Verfügbar unter: https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2005/478/de

[137] T. Nussbaumer, J. Good, A. Jenni, und R. Bühler, «Automatische Holzheizungen - Grundlagen und Technik», Verenum AG, ardens GmbH i. A. des Bundesamts für Energie, Zürich, 2001.

[138] «Schallschutz in Haustechnikanlagen», EDMZ, Bern, 1988.

[139] A. Moser, *Damit Grünschnitzelsilos keine Gefahr sind – Sicheres Arbeiten*, überarbeitete Auflage. Luzern: SUVA, 2015. Zugegriffen: 4. Juni 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.suva.ch/de-CH/material/Dokumentationen/damit-gruenschnitzelsilos-keine-gefahr-sind-sicheres-arbeiten

[140] K. H. Weber, *Inbetriebnahme verfahrenstechnischer Anlagen: Praxishandbuch mit Checklisten und Beispielen*, 5. Aufl. in VDI-Buch. Springer Vieweg, 2019. doi: 10.1007/978-3-662-59498-8.

[141] «QS-Support Holzfeuerungen - Holzenergie Schweiz». Zugegriffen: 24. November 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.holzenergie.ch/ueber-holzenergie/qualitaetssicherung/qs-support-holzfeuerungen.html

[142] QM Holzheizwerke, «FAQ 8 Wie soll die Beurteilung und die Darstellung der Daten in der Betriebsoptimierung erfolgen?» 10. Februar 2015. Zugegriffen: 18. Juni 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.qmholzheizwerke.ch/fileadmin/sites/qm/files/06_FAQ/FAQ08.pdf

[143] H. Schrammel, S. Metz, W. Tertschnig, und G. Lamers, «Effiziente Biomassenahwärme - Qualitätsmanagement für Heizwerke», klimaaktiv qm heizwerke, Gleisdorf, Broschüre, Dez. 2015. Zugegriffen: 18. Juni 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.klimaaktiv.at/erneuerbare/effiziente_heizwerke/qmheizwerke/broschuere.html

[144] «Qualitätsanalyse von Biomasseheizwerken – C.A.R.M.E.N. e.V.» Zugegriffen: 24. November 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.carmen-ev.de/service/dienstleistungen/qualitaetsanalyse-von-biomasseheizwerken/

[145] P. Küttel, *QMH-Wirtschaftlichkeitsrechnung*. (März 2018). ger. QM Holzheizwerke, Zürich. [Excel]. Verfügbar unter: https://www.qmholzheizwerke.ch/de/downloads.html

[146] S. Thalmann, *Mehrverbrauch*. (Mai 2020). Deutsch, Français, Italiano, English. Verenum AG, Zürich. [Excel]. Verfügbar unter: https://qmthermischenetze.ch/dokumente-tools/

[147] «DIN EN 14394:2008-12, Heizkessel - Heizkessel mit Gebläsebrennern - Nennwärmeleistung kleiner oder gleich 10 MW und einer maximalen Betriebstemperatur von 110 °C; Deutsche Fassung EN 14394:2005+A1:2008», Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/1421646.

[148] J. Good, T. Nussbaumer, J. Delcarte, und Y. Schenkel, «METHODS FOR EFFICIENCY DETERMINATION FOR BIOMASS HEATING PLANTS AND INFLUENCE OF OPERATION MODE ON PLANT EFFICIENCY», gehalten auf der 2nd World Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, Rom, Mai 2004, S. 4. Zugegriffen: 29. September 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/publication/312308376_METHODS_FOR_EFFICIENCY_DETERMINATION_FOR_BIOMASS_HEATING_PLANTS_AND_INFLUENCE_OF_OPERATION_MODE_ON_PLANT_EFFICIENCY

[149] J. Ködel, G. Oppermann, O. Arnold, M. Büchler, und M. Jutzeler, «Leitfaden Fernwärme / Fernkälte», Verband Fernwärme Schweiz für Bundesamt für Energie, Niederrohrdorf, Schlussbericht, Aug. 2018. Zugegriffen: 15. August 2019. [Online]. Verfügbar unter: https://www.fernwaerme-schweiz.ch/fernwaerme-deutsch-wAssets/docs/Dienstleistungen/Leitfaden-Fernaerme-Fernkaelte/Fernwaerme_Leitfaden-deutsch.pdf

[150] «DIN EN 1333:2006-06, Flansche und ihre Verbindungen - Rohrleitungsteile - Definition und Auswahl von PN; Deutsche Fassung EN 1333:2006», Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/9658127.

[151] «DIN EN ISO 6708:1995-09, Rohrleitungsteile - Definition und Auswahl von DN (Nennweite) (ISO 6708:1995); Deutsche Fassung EN ISO 6708:1995», Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/2819641.

www.qmholzheizwerke.ch
www.qmholzheizwerke.de
www.qmholzheizwerke.at

