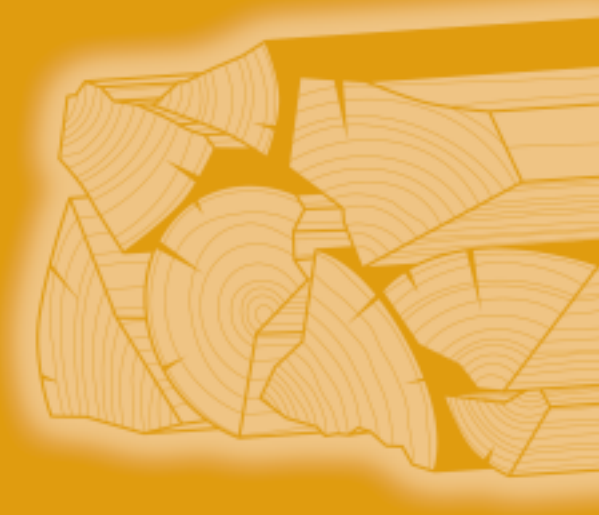


HANDBUCH
BIOENERGIE-KLEINANLAGEN



FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE e. V.

Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft

HANDBUCH
BIOENERGIE-KLEINANLAGEN



Autoren:
Dr. agr. Hans Hartmann
Dipl.-Ing. Klaus Thuneke
Dipl.-Forstwirt Dipl.-Ing. (BA) Alexander Höldrich
Dipl.-Phys. Paul Roßmann

Erarbeitet im Auftrag der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. durch das Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, Straubing, mit Förderung des Bundesministeriums für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL).

Herausgeber:
Dr. agr. Hans Hartmann

Autoren:
Dr. agr. Hans Hartmann
Dipl.-Ing. agr. Klaus Thuneke
Dipl.-Forstwirt Dipl.-Ing. (BA) Alexander Höldrich
Dipl.-Phys. Paul Roßmann

weitere Mitarbeit:
Dipl.-Ing. agr. (FH) Leonhard Meier
Heike Eismann und Helga Nielsen (Grafiken)

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.
Hofplatz 1
18276 Gülzow
Tel.: (0 38 43) 69 30-0
Fax: (0 38 43) 69 30-102
E-Mail: info@fnr.de
Internet: http://www.fnr.de

Redaktion:
Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.
Abt. Öffentlichkeitsarbeit

Gestaltung und Produktion:
tangram documents, Bentwisch

1. Auflage, Februar 2003
Alle Rechte vorbehalten.
Kein Teil dieses Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Herausgebers
in irgendeiner Form reproduziert oder unter Verwendung elektronischer
Systeme verarbeitet, vervielfältigt, verbreitet oder archiviert werden.

ISBN 3-00-011041-0

Inhaltsverzeichnis

1 Ziele des Leitfadens 8
HANS HARTMANN

1.1 Ausgangslage 8
1.2 Ziele 8
1.3 Abgrenzung 9

2 Biogene Brennstoffe im Energiesystem 11
HANS HARTMANN

2.1 Globale Vorteile der Biomasse 11
2.2 Definitionen 12
2.3 Energieverbrauch in Deutschland 12
2.4 Technische Nutzungspfade für Biomasse 13
2.5 Potenziale 14

3 Bereitstellung von Festbrennstoffen 15
HANS HARTMANN, ALEXANDER HÖLDRICH

3.1 Rohstoffangebot und -herkunft 15
3.1.1 Durchforstungs- und Waldrestholz 15
3.1.2 Be- und Verarbeitungsrückstände 16
3.1.3 Reststoffe der Landschaftspflege 17
3.1.4 Festbrennstoffe aus der Landwirtschaft 17
3.1.5 Altholz 18
3.2 Bereitstellungsketten (Übersicht) 18
3.3 Ernte und Aufbereitung 20
3.3.1 Brennholzwerbung im Wald 20
3.3.1.1 Die Axt 20
3.3.1.2 Die Motorsäge 20
3.3.1.3 Die weitere Ausrüstung 21
3.3.1.4 Arbeitsablauf und Arbeitssicherheit 22
3.3.2 Scheitholzaufbereitung 24
3.3.2.1 Sägen 24
3.3.2.2 Spalten 24
3.3.2.3 Kombinierte Säge-Spaltmaschinen 27
3.3.2.4 Stapel- und Umschlagshilfen 27

3.3.3 Techniken der Hackschnitzelerzeugung ... 28
3.3.3.1 Hacker ... 28
3.3.3.2 Schredder und Zerspaner ... 31
3.3.4 Brikett- und Pelletherstellung ... 31
3.3.4.1 Brikettierung ... 32
3.3.4.2 Pelletierung ... 33
3.4 Lagerung ... 33
3.4.1 Lagerungsrisiken ... 33
3.4.2 Lagerungstechniken ... 36
3.4.2.1 Scheitholz ... 36
3.4.2.2 Hackschnitzel ... 37
3.4.2.3 Pellets ... 39
3.4.3 Entnahme- und Beschickungssysteme ... 42
3.5 Trocknung ... 44
3.5.1 Grundlegendes zur Trocknung ... 44
3.5.2 Trocknungsverfahren ... 46
3.5.2.1 Natürliche Trocknung ... 46
3.5.2.2 Trocknung durch Belüftung ... 47
3.5.3 Trocknungseinrichtungen ... 49

4 Brennstoffeigenschaften und Mengenplanung ... 51
HANS HARTMANN

4.1 Elementarzusammensetzung ... 51
4.1.1 Hauptelemente ... 51
4.1.2 Emissionsrelevante Elemente ... 51
4.1.3 Spurenelemente (Schwermetalle) ... 52
4.2 Weitere Brennstoffeigenschaften und ihre Bedeutung ... 52
4.2.1 Wassergehalt und Brennstoff-Feuchte ... 52
4.2.2 Heizwert ... 53
4.2.3 Brennwert ... 54
4.2.4 Aschegehalt ... 55
4.2.5 Ascheerweichungsverhalten ... 55
4.3 Physikalisch-mechanische Eigenschaften ... 55
4.4 Brennstoffmengenrechnung (Umrechnungszahlen) ... 57

5 Grundlegendes zur Feststoff-Verbrennung ... 61
HANS HARTMANN

5.1 Begriffsdefinitionen ... 61
5.2 Ablauf der Verbrennung ... 63
5.3 Anforderungen an die Feuerungskonstruktion ... 65
5.4 Feuerungstechnische Besonderheiten der Beschickungsarten ... 66

6 Feuerungen und Anlagentechnik 68
HANS HARTMANN, PAUL ROSSMANN

6.1 Handbeschickte Feuerungen 68
6.1.1 Bauarten und Verbrennungsprinzipien 68
6.1.1.1 Durchbrand 68
6.1.1.2 Oberer Abbrand 69
6.1.1.3 Unterer Abbrand 70
6.1.2 Einzelfeuerstätten 70
6.1.2.1 Offene Kamine 72
6.1.2.2 Zimmeröfen 72
6.1.2.3 Kaminöfen 73
6.1.2.4 Speicheröfen 74
6.1.2.5 Küchenherde 75
6.1.2.6 Pelletöfen 76
6.1.3 Erweiterte Einzelfeuerstätten 77
6.1.3.1 Zentralheizungsherde 77
6.1.3.2 Erweiterte Kachelöfen oder Kamine 78
6.1.3.3 Pelletöfen mit Wasserwärmeübertrager 78
6.1.4 Zentralheizungskessel (handbeschickt) 79
6.1.4.1 Funktionsweise 80
6.1.4.2 Einsatzbereiche, Varianten und Ausstattung 80
6.1.4.3 Regelung 82
6.1.4.4 Wärmespeicher 83
6.1.4.5 Kombination mit anderen Wärmeerzeugern 86
6.2 Automatisch beschickte Feuerungen 87
6.2.1 Bauarten und Feuerungstypen 87
6.2.1.1 Unterschubfeuerungen 87
6.2.1.2 Quereinschubfeuerungen 87
6.2.1.3 Abwurffeuerungen (Pelletfeuerungen) 89
6.2.1.4 Halmgutfeuerungen 90
6.2.2 Feuerungskomponenten und Systemeinbindung 93
6.2.3 Sicherheitseinrichtungen 95
6.2.4 Regelung 96
6.3 Schornsteinsysteme 97
6.4 Kleine Wärmenetze 99

7 Wirkungsgrad, Emissionen, Aschequalität 103
HANS HARTMANN, ALEXANDER HÖLDRICH

7.1 Wirkungsgrade von Holzfeuerungen 103
7.2 Schadstoffemissionen 105
7.2.1 Bedeutung und Bezugsgrößen 105
7.2.2 Emissionsniveau von Biomassefeuerungen 107
7.2.2.1 Emissionen von Einzelfeuerstätten 107
7.2.2.2 Emissionen von Holzheizkesseln 108
7.2.2.3 Emissionen von Halmgutfeuerungen 111
7.3 Aschequalität und -verwendung 111

8 Rechtliche Anforderungen und Vorschriften 113
HANS HARTMANN, PAUL ROSSMANN

8.1 Zulassung von Feuerungsanlagen 113
8.2 Bauliche Anforderungen 115
8.2.1 Verbrennungsluftversorgung 115
8.2.2 Aufstellort der Feuerung und dessen Nutzung als Brennstofflager 115
8.2.3 Abgasanlagen 118
8.3 Kaminkehrung 120
8.4 Zulässige Brennstoffe und deren Einsatzbereich 120
8.5 Anforderungen, Emissionsbegrenzungen und -überwachung 123
8.5.1 Anforderungen an den Anlagenbetrieb 123
8.5.2 Emissionsbegrenzungen 123
8.5.3 Emissionsüberwachung 125

9 Kosten der Festbrennstoffnutzung 127
HANS HARTMANN

9.1 Brennstoffpreise und -kosten 127
9.2 Anlagenkosten 131
9.3 Kostenberechnung 133
9.3.1 Berechnungsgrundlagen 133
9.3.2 Beispielrechnungen 135

10 Stationäre Nutzung von Pflanzenölen 138
KLAUS THUNEKE, HANS HARTMANN

10.1 Ölgewinnung und -reinigung 138
10.2 Kraftstoffeigenschaften 139
10.3 Energetische Nutzung 140
10.3.1 Pflanzenölmotoren 140
10.3.2 Pflanzenöl-BHKW 141
10.3.3 Thermische Nutzung in Ölbrennern 144
10.4 Planungs- und Betriebshinweise 144
10.5 Anforderungen und Vorschriften 148
10.5.1 Genehmigung 148
10.5.2 Emissionsbegrenzungen 149
10.5.3 Vermeidung von Gefährdungen 149
10.5.4 Steuerliche Regelungen 150
10.5.5 Stromeinspeisung und -vergütung 151
10.6 Emissionen und Wirkungsgrade 151
10.7 Kosten und Wirtschaftlichkeit 153
10.7.1 Berechnungsgrundlagen 153
10.7.2 Wirtschaftlichkeitsrechnung 154

11 Quellenverzeichnis 157

Anhang 165

Anhang A: Bauarten von Kreissägen, Holzspaltern und Schneid-Spaltgeräten 166

Anhang B: Bauarten von mobilen Holzhackern 167

Anhang C: Bauarten von Einzelfeuerstätten für Holzbrennstoffe 168

Anhang D: Bauarten von Zentralheizungskesseln für Festbrennstoffe (Kleinanlagen) 170

Anhang E: Adressenlisten zu den Herstellerverzeichnissen in Anhang A bis D und zum Thema Pflanzenöl 172

Anhang F: Informationsstellen für öffentliche Fördermaßnahmen 181

Anhang G: Weiterführende Literatur (Bücher und andere Quellen) 181

Anhang H: Energieeinheiten und Umrechnungsfaktoren 182

Anhang I: Faktoren (F) zur Umrechnung von normierten Massenkonzentrationen auf energiemengenbezogene Emissionen 183

Anhang J: Faktoren (F) zur Umrechnung von Emissionsangaben bei unterschiedlichem Bezugssauerstoffgehalt 184

1 Ziele des Leitfadens

1.1 Ausgangslage

Der umweltfreundliche Einsatz und die weitere Verbreitung von biogenen Brenn- und Treibstoffen stellt ein unbestrittenes volkswirtschaftliches und umweltpolitisches Ziel dar. In vielen Bereichen der Biomassenutzung sind technologische Fortschritte zu verzeichnen, und auch der Beitrag dieser Energieträger zum gesamten Primärenergieverbrauch in Deutschland nimmt ständig zu. Gleichwohl besteht nach wie vor eine Reihe von Hemmnissen, die dazu führen, dass das vorhandene Energieträgerpotenzial nur sehr unzureichend ausgeschöpft wird.

Neben ökonomischen und technischen Restriktionen handelt es sich hierbei zu einem großen Teil um mangelnde Kenntnisse über die Chancen und Möglichkeiten, die sich mit der Nutzung dieser Energieressourcen bieten. Das trifft in besonderem Maße bei den Kleinanlagen für häusliche oder kleingewerbliche Anwendungen zu. Umfragen unter den Technikanbietern zeigen, dass mangelnde Information in diesem Bereich sogar die am häufigsten genannte Hemmnisursache darstellt /1-7/. Der Beratung und Schulung kommt somit eine wesentliche Bedeutung für die Beseitigung dieser Defizite zu. Darüber hinaus führt ein verbessertes Informationsangebot auch zur Überwindung weiterer ebenfalls häufig genannter Hemmnisse. Hierzu zählen das „schlechte Image“, das „geringe Vertrauen in die Funktionsfähigkeit der Anlagen“ und die „schwierige Brennstoffbeschaffung“ /1-7/.

Maßnahmen, die auf einen verstärkten Biomasseeinsatz in Kleinanlagen abzielen, sind aber auch noch aus einem anderen Grund besonders sinnvoll. In diesem Leistungssegment handelt es sich in der Regel um private oder kleingewerbliche Investoren, die sich meist durch eine höhere Entscheidungsbereitschaft und -fähigkeit auszeichnen, so dass die Realisierung einer Installation rascher erfolgen kann. Das liegt auch daran, dass es sich bei solchen Anlagen meist um technisch überschaubare Konzepte mit kalkulierbarem wirtschaftlichen Risiko handelt, zumal die Anlagen vorrangig der Deckung eines (Heiz-) Wärmebedarfs durch Niedertemperaturanwendung dienen.

Bei der Verbesserung des Informationsangebotes im Kleinanlagenbereich ist eine besondere Dringlichkeit gegeben. Im Zuge der neuen Energieeinsparverordnung (EnEV) steht die Erneuerung von rund 4,5 Millionen Heizungsanlagen bis zum Jahr 2005 an /1-1/. Darüber hinaus werden derzeit auf Länder-, Bundes- und EU-Ebene vielerlei Anstrengungen zur Erhöhung des Beitrags erneuerbarer Energien unternommen; beispielsweise wird im Klimaschutzprogramm der Bundesregierung eine Verdoppelung von 2000 bis 2010 sowie eine weitere deutliche Steigerung nach 2010 angestrebt /1-3/. Damit würde sich der Anteil der erneuerbaren Energien bei der Stromerzeugung auf 10 % und beim gesamten Primärenergieeinsatz auf 4 % erhöhen. Auch nach den Vorstellungen der Europäischen Kommission soll sich dieser Anteil im gleichen Zeitraum bis 2010 verdoppeln (von 6 % auf 12 %), wobei die Biomasse den weitaus größten Einzelbeitrag leisten soll, da sie sich gegenüber dem Stand von 2000 sogar verdreifachen soll /1-5/.

1.2 Ziele

Im vorliegenden Leitfaden wird versucht, das Wissen über den Einsatz biogener Brennstoffe in kleineren Anlagen zu systematisieren und aufzubereiten. Dabei wird der Versuch unternommen, einerseits grundlegende, zum Teil komplexe Zusammenhänge allgemein verständlich darzustellen und andererseits anwendungsbezogene technische, organisatorische, wirtschaftliche und rechtliche Fragen umfassend zu beantworten. Dadurch kann der Leitfaden als

Projektierungs- und Ausführungshilfe für die am Prozess der Brennstoffbereitstellung und -nutzung beteiligten Akteure aber auch für die beratenden öffentlichen und privaten Einrichtungen dienen. Im Einzelnen soll der Leitfaden

- Interesse an der Realisierung eigener Projektideen für die Biomassenutzung wecken,
- die Beurteilung eigener Spielräume für die Biomassenutzung erleichtern,
- Basiswissen vermitteln,
- einen Überblick über die technischen Möglichkeiten im Bereich kleiner Anlagen geben,
- Hilfestellung bei der Bewertung von biogenen Brennstoffen und ihren Einsatzmöglichkeiten bieten,
- die Systemauswahl und -konfiguration erleichtern,
- Sicherheit im Umgang mit den Fachbegriffen vermitteln,
- die rechtlichen Rahmenbedingungen vorstellen,
- Planungsdaten liefern und Fehleinschätzungen vermeiden helfen,
- Verbesserungsmöglichkeiten an bereits existierenden Anlagen aufzeigen,
- die Brennstoffbeschaffung und -handhabung erleichtern,
- die für die Realisierung notwendigen Kontakte vermitteln sowie
- als Nachschlagewerk für alle Fragen rund um das Thema Kleinanlagen dienen.

Durch diese Zielvorgabe richtet sich der Leitfaden grundsätzlich an alle Personen, die sich für die energetische Biomassenutzung interessieren und in ihrem unmittelbaren Einflussbereich mit der Problematik in Berührung kommen. Damit ist für den Leitfaden eine sehr breite Zielgruppe gegeben; sie umfasst die privaten Haushalte im ländlichen und städtischen Raum, kleine Gewerbebetriebe, Planer und Architekten, Brennstoffproduzenten oder -händler, private oder öffentliche Beratungsstellen und Andere.

1.3 Abgrenzung

Der vorliegende Leitfaden stellt eine Ergänzung zu dem bereits seit September 2000 vorliegenden „Leitfaden Bioenergie“/1-6/ dar. Darin wurde der Bereich der Kleinanlagennutzung (<100 kW) gezielt ausgeklammert, um zunächst einen Beitrag zur Lösung der Probleme bei der Planung, Genehmigung, Errichtung und beim Betrieb größerer Energieanlagen für die zentrale Wärme- und ggf. auch Stromerzeugung aus Biomasse zu leisten. Außerdem blieb der weite Bereich der gerade bei Kleinanlagen völlig andersartigen Logistikfragen und Brennstoffbeschaffungsprobleme auch auf Grund der Verschiedenartigkeit der hier verwendeten Brennstoffe weitgehend unberücksichtigt.

Der vorliegende „Leitfaden Kleinanlagen“ ist hingegen auf die speziellen Bedürfnisse der privaten und kleingewerblichen Nutzer zugeschnitten und legt somit auch einen Schwerpunkt bei den stückigen und den veredelten Brennstoffen wie z. B. Pellets oder Briketts. Die „Lebenswege“ dieser Brennstoffe unterscheiden sich zum Teil ganz wesentlich von den Brennstoffen, die für Großanlagen in Frage kommen (vgl. /1-6/). Auch handelt es sich meist um vollkommen andere Produzenten und Vertriebssysteme. Ebenso sind die technischen Anforderungen an den Brennstoff verschieden, da es sich ja auch um andere Verbrennungstechniken handelt, als bei den Großanlagen. Die genutzten Rohstoffquellen sind ebenfalls nur zum Teil die Gleichen, da bei den Großanlagen zum Teil auch Brennstoffe eingesetzt werden, die für Kleinanlagen untauglich sind. Hierzu zählen z. B. viele Nebenprodukt-Sortimente der Holzbe- und -verarbeitung, Gebrauchthölzer oder Rückstände der Nahrungs- oder Futtermittelproduktion sowie speziell angebaute Energiepflanzen, wie z. B. Holz oder Halmgut aus Kurzumtriebsplantagen bzw. aus dem Getreideanbau.

Im vorliegenden Kleinanlagen-Leitfaden wird dagegen ein kleineres Brennstoffsortiment betrachtet. Neben den Holzbrennstoffen werden daher lediglich noch die Möglichkeiten der Halmgutnutzung in Kleinanlagen sowie – am Rande – die Körnerverbrennung angesprochen. Zur Abrundung wird schließlich auch die Gewinnung von naturbelassenem Pflanzenöl und dessen energetische Nutzung in kleinen Blockheizkraftwerken mit einer Leistung von ca. 5 bis 100 kW betrachtet. Nicht berücksichtigt ist dagegen der Einsatz von Biokraftstoffen für den Transportsektor (z. B. PKW, Traktoren), da es sich hierbei nicht um einen vorrangigen Einsatz für Heizzwecke handelt. Auch die Erzeugung und Nutzung von Biogas bleibt unberücksichtigt, da hierfür beim Betreiber in der Regel wesentlich andere, meist speziellere betriebliche Voraussetzungen gegeben sein müssen.

Die Darstellung der Techniken für die energetische Umwandlung konzentriert sich auf heute marktgängige und praxisreife Verfahren und Konzepte, die direkt und mit vergleichsweise hoher Betriebssicherheit umgesetzt werden können. Das bedeutet, dass beispielsweise die Biomassevergasung für eine gekoppelte Wärme- und Stromerzeugung nicht behandelt wird, da sie sich selbst bei Großanlagen heute noch im

Demonstrationsstadium befindet. Generell gilt diese Abgrenzung auch für den gesamten Bereich der Kraft-Wärme-Koppelung mit Festbrennstoffen, da diese im betrachteten Leistungsbereich bis 100 kW in absehbarer Zeit nicht wirtschaftlich betrieben werden können, obgleich die kürzlich stark verbesserten Rahmenbedingungen, wie zum Beispiel die im Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) /1-4/ festgeschriebenen degressiven Mindestvergütungssätze für die Einspeisung von biogenem Strom (zur Zeit 0,086 bis 0,101 €/kWh), eine solche Vermutung nahe legen. Für die bei der Vergasung und Stromerzeugung geltenden technischen Grundlagen und die vorliegenden Praxiserfahrungen (die auch nicht im o. g. Leitfaden für Großanlagen beschrieben werden) sei auf die weiterführende Literatur verwiesen (z. B. /1-8/, /1-9/).

Biogene Brennstoffe im Energiesystem

2

Kaum ein Energierohstoff bietet so viele Anwendungsvarianten und Nutzungsaspekte wie die Biomasse. Da auch der technologische Entwicklungsstand je nach Verfahren sehr unterschiedlich sein kann und sehr vielfältige Umweltwirkungen vorliegen, ist eine umfassende Darstellung kaum möglich. Für eine grobe Einführung in das Thema „Bioenergie“ sollen daher nachfolgend lediglich einige ökologische und technische Orientierungshilfen gegeben werden.

2.1 Globale Vorteile der Biomasse

Im Gegensatz zu den fossilen Energieträgern (z. B. Kohle, Erdöl, Erdgas, Uran) gelten biogene Brenn- und Treibstoffe als klimaschonend, da es durch deren Nutzung kaum zur Erhöhung der Konzentration an klimawirksamen Gasen in der Erdatmosphäre kommt. Bei diesen klimawirksamen Gasen handelt es sich vor allem um Kohlendioxid (CO_2), das bei der Verbrennung fossiler Energieträger freigesetzt wird, aber auch um Methan (CH_4) oder Distickstoffoxid (N_2O). Diese Gase werden für den sogenannten anthropogenen Treibhauseffekt verantwortlich gemacht; er führt letztlich zu einer Veränderung des Weltklimas.

Bei der energetischen Nutzung von Biomasse wird zwar ebenfalls Kohlendioxid (CO_2) freigesetzt, allerdings wurde die dabei emittierte Menge an CO_2 zuvor durch das Pflanzenwachstum der Atmosphäre entzogen und in der organischen Masse gebunden (Abb. 2.1). Dennoch sind auch biogene Energieträger nicht vollkommen „CO_2-neutral“, da – selbst bei nachhaltiger Produktionsweise – fossile Energieträger für die Bereitstellung und Nutzung der Biomasse benötigt werden (z. B. für die Produktion von Düngemitteln, bei Ernte und Transport oder als elektrische Energie für die Beschickung oder Feuerungsregelung).

Ein weiterer Vorteil der Biomasse liegt in der Schonung der endlichen fossilen Energieressourcen. Alle biogenen Brennstoffe lassen sich letztlich auf den Photosyntheseprozess als „Herstellungsverfahren“ zurückführen, es handelt sich also um eine indirekte Solarenergienutzung. Das gilt für sämtliche Biomassefraktionen wie holzartige Reststoffe, halmgutartige Rückstände und Nebenprodukte, Dung bzw. dem daraus gewinnbaren Biogas sowie den Energiepflanzenanbau. Als „gespeicherte Sonnenenergie“ ist die Biomasse somit eine erneuerbare („regenerative“) und damit in menschlichen Zeitvorstellungen quasi unerschöpfliche Energiequelle /1-8/. Zumindestens gilt das wenn sie nachhaltig erzeugt wird, das heißt, dass im Mittel nur die Menge an organischer Masse genutzt werden darf, die wieder nachwächst, wobei die Produktivität der Aufwuchsflächen langfristig erhalten bleiben muss. Hierin liegt auch der wesentli-

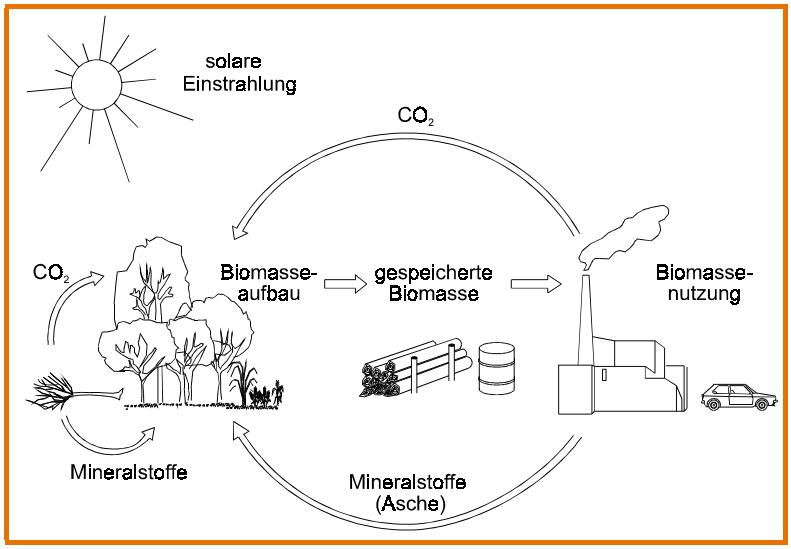


Abb. 2.1: Geschlossene Stoffkreisläufe in Bioenergiesystemen

che Unterschied zu den nicht erneuerbaren (fossilen) Energieträgern wie Kohle, Erdöl, Erdgas.

2.2 Definitionen

Biomasse. Unter dem Begriff Biomasse werden sämtliche Stoffe organischer Herkunft (d. h. kohlenstoffhaltige Materie) verstanden. Biomasse beinhaltet damit

- die lebende oder abgestorbene (aber noch nicht fossile) Pflanzen- und Tiermasse (z. B. Holz oder Stroh),
- die daraus resultierenden Rückstände (z. B. tierische Exkremente wie Dung),
- alle weiteren organischen Stoffe, die durch eine technische Umwandlung entstanden sind oder bei der stofflichen oder Nahrungsmittelnutzung anfallen (z. B. Pflanzenöl, Alkohol, Papier, Schlachthofabfälle).

Die Abgrenzung der Biomasse gegenüber den fossilen Energieträgern beginnt beim Torf, dem fossilen Sekundärprodukt der Verrottung. Damit zählt Torf im strengeren Sinn dieser Begriffsabgrenzung nicht mehr zur Biomasse. Dies widerspricht der in einigen Ländern (u. a. Schweden, Finnland) üblichen Praxis, wo Torf auf Grund der hohen Nachbildungsraten zur Biomasse gezählt wird /1-8/.

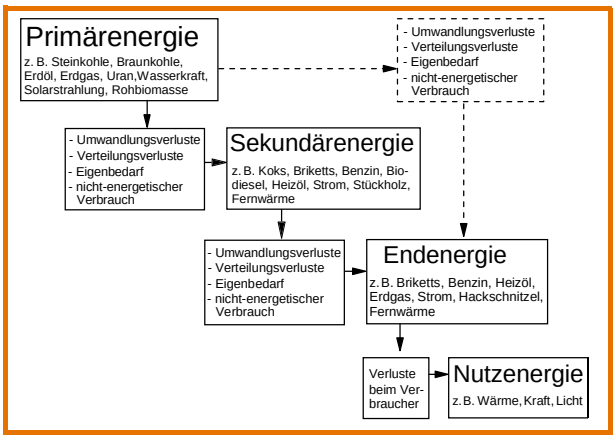


Abb. 2.2: Energiewandlungskette /2-4/

Energien und Energieträger. Unter einem Energieträger wird ein Stoff verstanden, aus dem direkt oder durch eine oder mehrere Umwandlungen Nutzenergie gewonnen werden kann. Energieträger können nach dem Grad der Umwandlung unterteilt werden in Primär- und Sekundärenergieträger sowie Endenergieträger (Abb. 2.2). Der jeweilige Energieinhalt dieser Energieträger ist die Primärenergie, die Sekundärenergie und die Endenergie; aus Letzterer wird die Nutzenergie gewonnen. Diese einzelnen Begriffe sind wie folgt definiert:

- Unter der Primärenergie werden Energieformen oder Energieträger verstanden, die noch keiner technischen Umwandlung unterworfen wurden.
- Sekundärenergieträger werden durch Umwandlungen in technischen Anlagen aus Primär- oder anderen Sekundärenergieträgern hergestellt. Dabei kommt es u. a. zu Umwandlungs- und Verteilungsverlusten.
- Unter Endenergieträgern (bzw. Endenergie) werden die Energieformen verstanden, die der Endverbraucher bezieht (z. B. Heizöl oder Rapsöl im Öltank vor dem Ölbrenner, Scheitholz oder Holzhackschnitzel an der Feuerungsanlage, elektrische Energie vor dem Stromzähler, Fernwärme an der Hausübergabestation).
- Als Nutzenergie wird letztlich die Energie bezeichnet, die nach der letzten Umwandlung in den Geräten des Verbrauchers für die Befriedigung der jeweiligen Bedürfnisse (z. B. Raumtemperierung, Nahrungszubereitung, Information, Beförderung) zur Verfügung steht. Sie wird gewonnen aus Endenergieträgern bzw. der Endenergie, vermindert um die Verluste dieser letzten Umwandlung (z. B. Verluste infolge der Wärmeabgabe einer Glühbirne für die Erzeugung von Licht, Verluste in einer Hackschnitzelfeuerung bei der Nutzwärmebereitstellung).

2.3 Energieverbrauch in Deutschland

Der Primärenergieverbrauch in Deutschland (2000: rund 14 173 Petajoule/a) wird von den fossilen Energieträgern und der Kernenergie dominiert. Nach wie vor ist das Mineralöl mit 38,6 % der wichtigste Energieträger in der deutschen Energiewirtschaft. Kohle (Stein- und Braunkohle) und Erdgas leisten mit 24,4 %

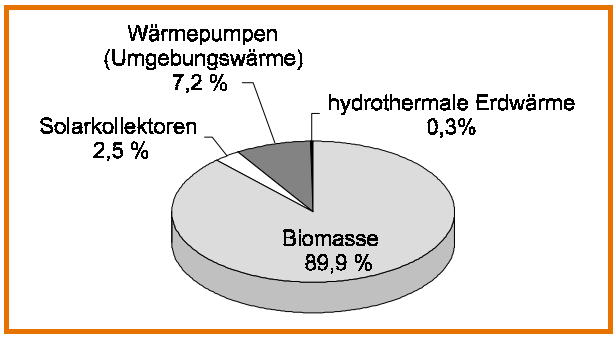


Abb. 2.3: Derzeitige Wärmenutzung aus erneuerbaren Energiequellen nach einzelnen Energieträgern /2-5/

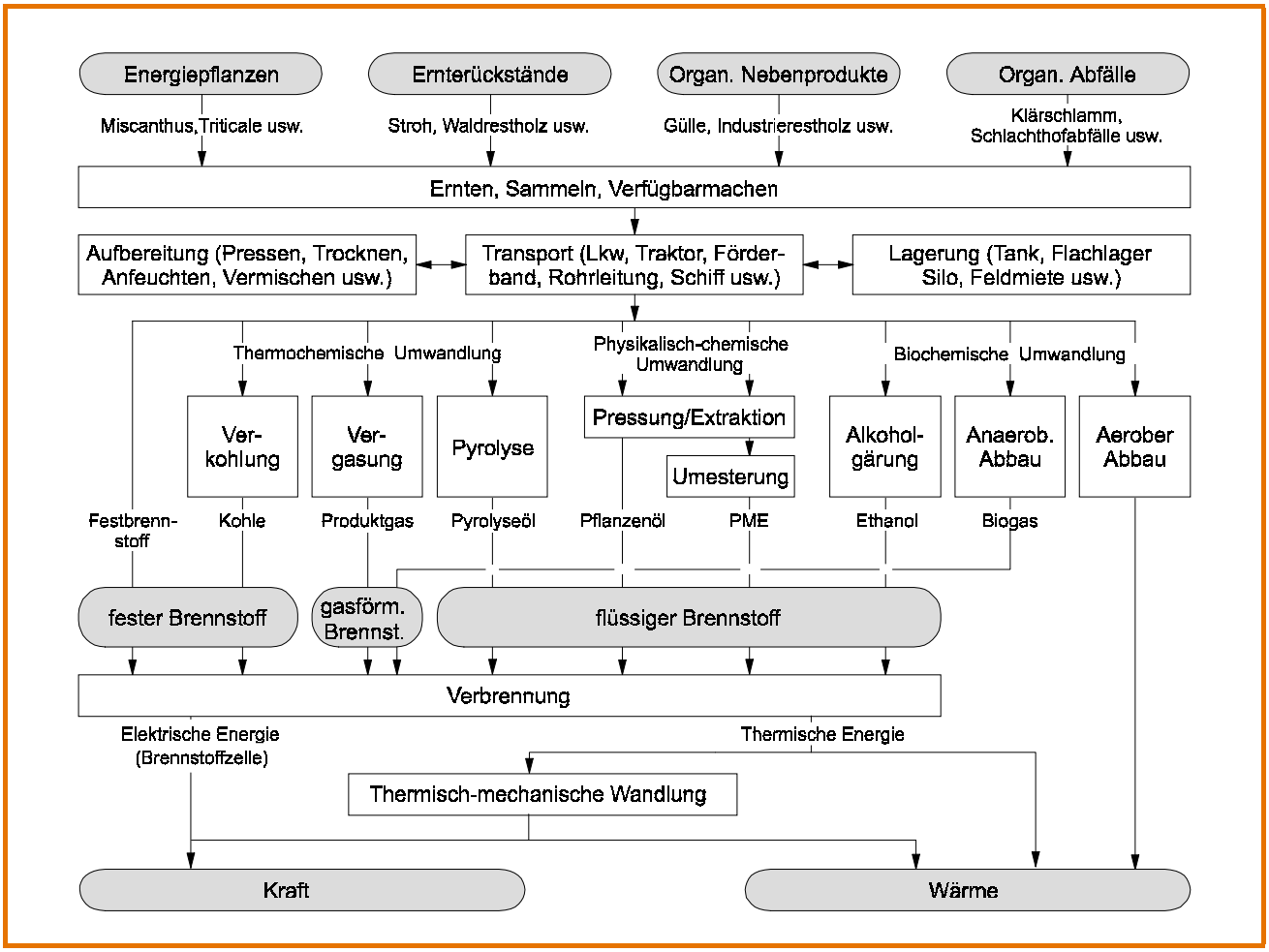


Abb. 2.4: Schematischer Aufbau typischer Bereitstellungsketten zur End- bzw. Nutzenergiebereitstellung aus Biomasse (grau unterlegte Kästen: Energieträger, nicht grau unterlegte Kästen: Umwandlungsprozesse) /2-4/

bzw. 21,1 % einen etwa gleich großen Beitrag, gefolgt von der Kernenergie mit 13,1 %. Regenerative Energien (in erster Linie Biomasse, Wind- und Wasserkraft) tragen nur mit ca. 2,8 % zur Primärenergieversorgung bei /2-2/.

Etwa 88 % der Wärmeerzeugung aus regenerativen Energien stammt derzeit aus der Nutzung biogener Festbrennstoffe (ca. 196 PJ/a Endenergie); das entspricht knapp 4 % des Wärmebedarfs in Deutschland (Abb. 2.3). Zur Stromerzeugung (Einspeisung) tragen die biogenen Festbrennstoffe jedoch mit 0,05 % des Stromverbrauchs nur unwesentlich bei; auch beim Biogas ist dieser Anteil kaum höher.

Zu den wichtigsten regenerativen Energieträgern in Deutschland zählt das Holz, wobei das direkt im Wald gewonnene Holz (d. h. Waldrestholz, Schwachholz, Industrieholz und ggf. Stammholz) bei der Erzeugung von Wärme und Strom mit über 71 % deutlich überwiegt. Weitere Anteile sind: Industrierestholz (21 %), Altholz (6 %) und sonstige (Stroh u. a.) ca. 2 % /2-5/.

2.4 Technische Nutzungspfade für Biomasse

Die Möglichkeiten einer energetischen Biomassenutzung sind vielfältig. Im einfachsten Fall wird beispielsweise Holz nach einer mechanischen Aufbereitung (z. B. Hacken, Spalten) direkt in einer Feuerungsanlage verbrannt. Für zahlreiche andere Anwendungen (z. B. Treibstoff im Transportsektor oder die Stromerzeugung) ist es aber sinnvoll oder sogar notwendig, flüssige oder gasförmige Sekundärenergieträger herzustellen. Der Umwandlung in Nutzenergie sind somit Veredelungsprozesse vorgeschaltet. Das führt z. B. zu Verbesserungen bei der Energiedichte, der Handhabung, den Speicher- und Transporteigenschaften oder der Umweltverträglichkeit der energetischen Nutzung.

Die Veredelungsverfahren, durch die die Biomasse in feste, flüssige oder gasförmige Sekundärenergieträger umgewandelt wird, lassen sich unterscheiden in thermochemische, physikalisch-chemische

und biochemische Verfahren. Eine Übersicht über die prinzipiellen Möglichkeiten zeigt Abb. 2.4. Von diesen Nutzungspfaden werden im vorliegenden Leitfaden jedoch nur die dezentral (kleintechnisch) anwendbaren Verfahren angesprochen, bei denen die Vielfalt stark eingeschränkt ist. Für weitergehende Betrachtungen sei deshalb auf die vertiefende Literatur verwiesen (vgl. /2-3/, /2-4/).

2.5 Potenziale

Von den 52 Mrd. Hektar (ha) Erdoberfläche sind 15 Mrd. ha Land. Ein knappes Viertel ist mit Wald bedeckt. Deutschland liegt mit 30 % Waldanteil knapp über dem Weltdurchschnitt. Mit einem Anteil von 90 % sind die Wälder der mit Abstand größte Biomasseproduzent.

In Deutschland ist ein erhebliches technisches Potenzial für eine energetische Biomassenutzung gegeben. Neuere Untersuchungen zeigen, dass hierbei mit insgesamt mindestens 1 250 Petajoule (PJ) pro Jahr zu rechnen ist /2-7/, das entspricht etwa 9 % des gesamten Primärenergieverbrauchs Deutschlands von ca. 14 200 PJ/a (Kapitel 2.3). Dabei teilt sich das Biomassepotenzial auf in ca. 730 PJ/a aus Nebenprodukten, Rückständen und Abfällen, ca. 180 PJ/a aus der Biogasgewinnung und ca. 340 PJ/a aus dem Anbau spezieller Energiepflanzen wie z. B. Kurzumtriebsplantagen, Miscanthus oder Raps als Öl- und Festbrennstoff-liefernde Pflanze (Abb. 2.5).

Die Stellung der Biomasse ist aber auch noch aus einem anderen Grund besonders günstig. Im Vergleich zu den übrigen regenerativen Energieträgern kann ihr Potenzial nahezu vollständig ausgenutzt werden, da sie sich in weitaus größerem Maß bedarfsgerecht einsetzen lässt. Hier wirkt sich aus, dass es sich um chemisch gebundene und damit transportier- und speicherbare Sonnenenergie handelt, die somit nicht darauf angewiesen ist, dass Energieangebot und -nachfrage jederzeit räumlich und zeitlich zusammentreffen müssen. Bei den übrigen regenerativen Energien – beispielsweise bei der solarthermischen oder geothermischen Wärmenutzung – sind diese Vorteile nicht gegeben.

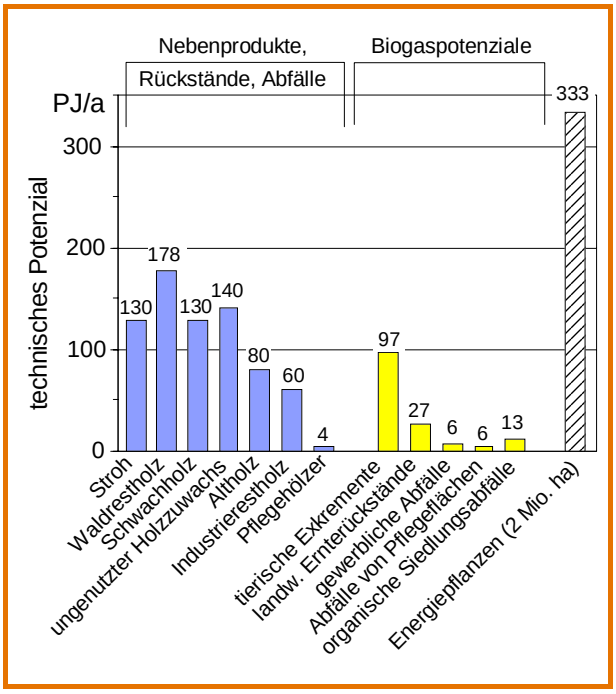


Abb. 2.5: Technische Potenziale einer energetischen Nutzung von Biomasse in Deutschland (nach /2-7/, konservativer Ansatz).
Zum Vergleich: der Primärenergieverbrauch in Deutschland lag in 2000 bei 14 200 PJ

3 Bereitstellung von Festbrennstoffen

3.1 Rohstoffangebot und -herkunft

Biogene Festbrennstoffe können eine sehr unterschiedliche Herkunft haben. Entsprechend groß ist auch die Vielfalt bei den Brennstoffarten, Aufbereitungsformen und Qualitäten. Die Brennstoffe stammen aus der

- Durchforstung und Ernte von Waldholz,
- Holzbe- und -verarbeitenden Industrie,
- Landschaftspflege (Holz und Halmgut),
- Landwirtschaft (Energiepflanzen, Stroh, Aufbereitungsrückstände, etc.) und der
- Entsorgung (Gebrauchtholz).

Nachfolgend wird hierzu ein kurzer Überblick gegeben.

3.1.1 Durchforstungs- und Waldrestholz

Bei der Produktion von möglichst hochwertigem Stammholz für die stoffliche Nutzung fallen minderwertige Sortimente und Rückstände an, die unter anderem als Brennstoff genutzt werden können. Hier unterscheidet man das Schwachholz und das Waldrestholz aus dem Schlagabraum (der wiederum in Kronenderbholz, Reisholz und Rinde unterteilt werden kann) sowie den Stock, der allerdings selten genutzt wird.

Schwachholz. Schwachholz fällt bei Durchforstungsmaßnahmen an, die in Zyklen von ca. 10 Jahren wiederkehrend durchgeführt werden. Dabei werden konkurrierende, kranke oder minderwertige Bäume entfernt. Da es sich um Sortimente mit geringem Brusthöhendurchmesser (BHD) zwischen ca. 7 und rund 20 cm handelt, erzielen sie als Industrieholz nur geringe Erlöse, so dass alternativ auch die Aufarbeitung als Brennholz in Frage kommt. Es handelt sich dann entweder um eine Vollbaumnutzung als Hackschnitzel (mit Feinästen aber meist ohne Nadeln) oder um eine Aufarbeitung zu stückigem Brennholz (nach Entfernen des Reisholzes mit weniger als ca. 7 cm Durchmesser) /3-27/. Bei jeder Durchforstung kann von einem durchschnittlichen flächenspezifischen Hackschnitzelaufkommen von rund 70 Schüttraummetern (Srm) pro Hektar ausgegangen werden /3-56/; bei einem Durchforstungszyklus von ca. 25 Jahren entspricht dies jährlich rund 3 Srm oder ca. 0,5 t lufttrockene Hackschnitzel pro Hektar.

Waldrestholz. Der Teil des Holzes, welcher nach der Holzernte, d. h. Entnahme sämtlichen industriell oder anderweitig nutzbaren Holzes, im Bestand verbleibt, ist das Waldrestholz (auch „Schlagabraum“). Von diesem Schlagabraum können das Kronenmaterial oder die kurzen Stammabschnitte zu Hackschnitzeln oder Scheitholz aufgearbeitet werden. Das Reisholz (inkl. Nadeln) und zum Teil auch die eventuell anfallende Rinde (bei Waldentrindung) verbleiben hingegen meist im Wald /3-27/.

Die Aufarbeitung des Schlagabraums zu stückigem Brennholz oder Hackschnitzeln erfolgt entweder durch den Forstbetrieb selbst, durch einen Lohnunternehmer oder durch private Nutzer, die als „Selbstwerber” eine begrenzte Teilfläche als „Flächenlos” zugewiesen bekommen (häufig kostenlos oder gegen geringe Bezahlung) und die Aufarbeitung in Eigenregie durchführen.

Die aus Waldrestholz gewinnbare und auf das Jahr gerechnete Brennholzmenge liegt etwa bei 0,4 bis 0,8 t/ha (lufttrocken). Zusammen mit dem Durchforstungsholz erreicht der jährliche Holzbrennstoffertrag aus dem Wald selten mehr als 1,5 t/ha, sofern nicht minderwertige Industrieholzsortimente wie z. B. „Stangenholz” (bis 14 cm Durchmesser) ebenfalls zu Brennholz verarbeitet werden.

3.1.2 Be- und Verarbeitungsrückstände

Ein ebenfalls bedeutendes Holzaufkommen stellt der Rückstand der Holzbe- und -verarbeitenden Industrie dar, allerdings wird der größte Teil dieser Reststoffe stofflich verwertet /3-27/. Das anfallende Restholz wird durch stationäre Hacker oder chargenweise von Lohnunternehmern mit mobilen Hackern aufgearbeitet. Rindenfreie Hackschnitzel („weiße Hackschnitzel"), die z. B. bei der Bearbeitung von vorentrindetem Stammholz anfallen, erzielen oft einen relativ hohen Preis in weiterverarbeitenden Industrien, so dass für eine energetische Nutzung zunächst eher das Hackgut mit anhaftender Rinde („schwarze Hackschnitzel") in Frage kommt. Es wird z. B. aus Schwarten und Spreißeln gewonnen (Abb. 3.1). Das Hackgut kann dann vom Be- und Verarbeitungsbetrieb zur Abholung durch Kleinverbraucher angeboten werden. Meist wird es aber von überregional arbeitenden Großhändlern vermarktet.

Die Schwarten und Spreißel lassen sich aber auch zu Scheitholz aufarbeiten. Da dies in der Regel nicht am Sägewerk stattfindet, müssen sie zunächst mit Stahlbändern zu transportfähigen Großbunden von

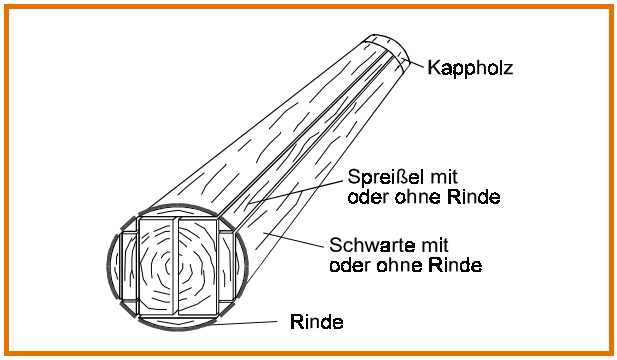


Abb. 3.1: Sägerestholzanfall bei der Rohholzbearbeitung (nach /3-39/)

jeweils ca. 3 Raummetern (Rm) gebündelt werden, bevor sie vom Sägewerksbetreiber oder vom Restholzgroßhändler – zum Teil auch in kleinen Mengen – angeliefert werden.

Bei den Be- und Verarbeitungsresthölzern konkurriert die energetische Nutzung mit stofflichen Verwendungsmöglichkeiten; das zeigt Abb. 3.2. Eine Zusammenfassung der am Markt angebotenen Brennholzsortimente sowie deren Beschaffungsmöglichkeit bietet Tabelle 3.1.

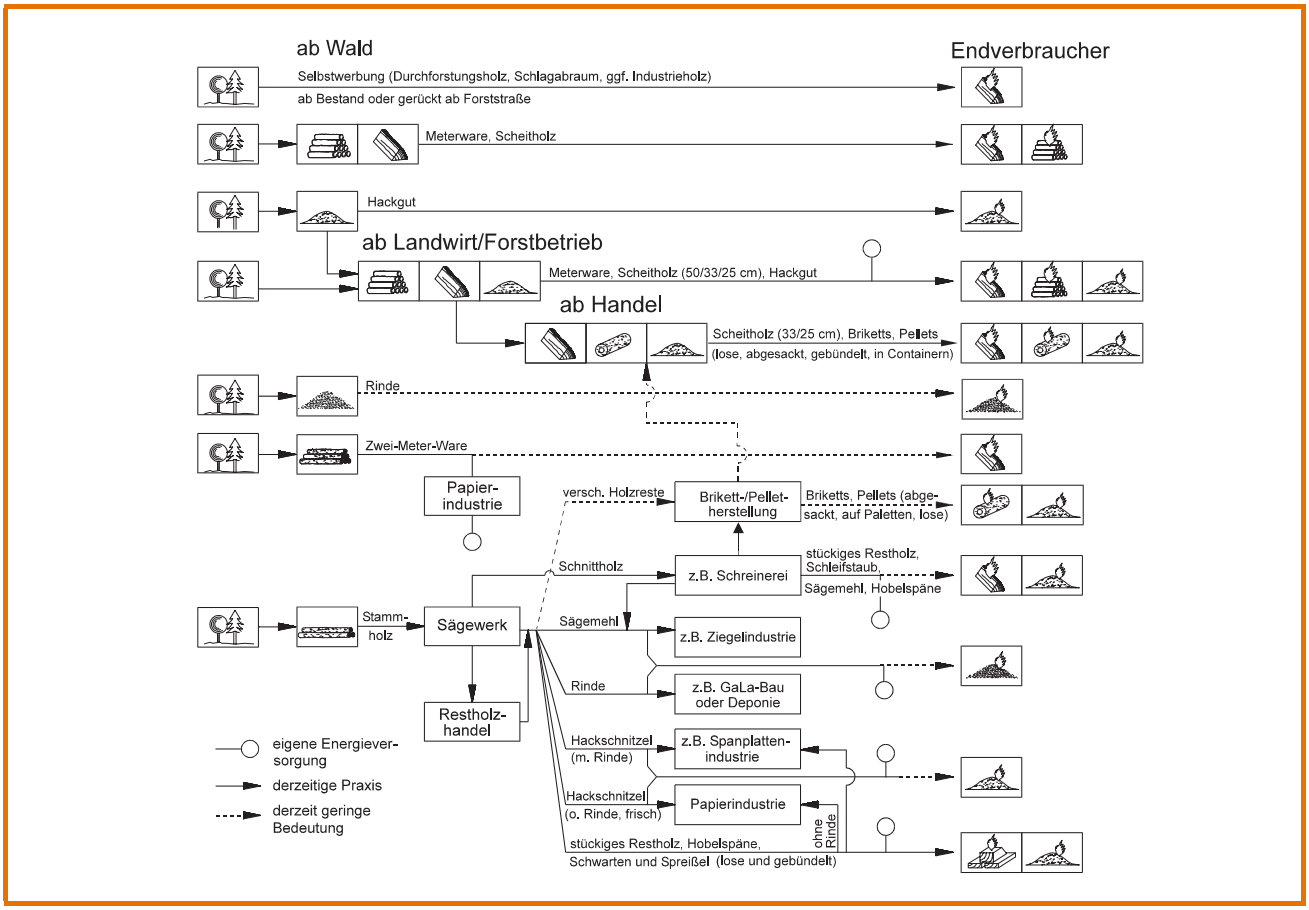


Abb. 3.2: Herkunft von Restholzbrennstoffen und Wege vom Wald bis zum Endverbraucher /3-15/

Tabelle 3.1: Übersicht über Angebotsformen und Beschaffungsmöglichkeiten von Holzbrennstoffen (nach /3-15/)

Anbietergruppe	Angebot ab Wald							Angebot ab Lager / Hof / Betrieb / Markt																		Lieferservice
	Selbstwerbung	2 Meter-Ware	Meterholz	Scheitholz 33 cm	Scheitholz 25 cm	Hackschnitzel mit Rinde	Rinde	2-Meter-Ware	Meterholz ungespalten	Meterholz gespalten	SH 33 cm ungespalten	SH 33 cm gespalten	SH 25 cm ungespalten	SH 25 cm gespalten	Schwarten und Spreißel	lose Endstücke	Sackware	Holzbriketts	Rindenbriketts	Holzpellets nach DIN	Holzkohle	Sägemehl	Rinde	Hackschnitzel	Hobelspäne	
Landwirte	(x)	(x)	(x)	-	-	(x)	-	-	x	x	(x)	x	(x)	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x
Forstämter	x	x	(x)	-	-	-	(x)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(x)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Forstbetriebe	x	-	x	(x)	-	(x)	(x)	-	(x)	(x)	(x)	x	-	(x)	-	-	(x)	-	-	-	-	-	-	-	-	x
forstl. Zusammenschlüsse	x	-	x	-	-	(x)	(x)	-	x	x	(x)	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(x)
Liefergemeinschaften für Waldhackgut	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	x
Kommunale Anbieter	x	-	x	-	-	-	-	-	(x)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Forstserviceunternehmen	-	x	(x)	-	-	(x)	-	-	(x)	(x)	-	(x)	-	(x)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(x)	-	x
Sägewerke	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(x)	-	-	x	x	-	(x)	(x)	-	-	x	x	x	(x)	(x)
Großhändler für Resthölzer	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	x	-	-	-	-	-	x	x	x	x	x
Holz- und Brennstoffhandel	-	-	(x)	-	-	-	-	(x)	x	(x)	(x)	x	(x)	(x)	-	(x)	x	x	x	x	(x)	-	-	-	-	x
Sekundärverarbeiter von Nutzholz	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	x	(x)	-	-	-	(x)	-	-	-	(x)
Bau- und Verbrauchermärkte	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(x)	-	(x)	-	-	-	x	(x)	-	x	-	-	-	-	(x)
Nebenerwerbsanbieter	(x)	-	x	-	-	-	-	-	x	x	(x)	x	(x)	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(x)

Erläuterung: x „wird angeboten“ (x) „Angebot möglich, aber selten“ - „Angebot nicht bekannt“ SH = Scheitholz

3.1.3 Reststoffe der Landschaftspflege

Landschaftspflegeholz fällt bei Pflegearbeiten, Baumschnittaktivitäten in der Land- und Gartenbauwirtschaft und/oder sonstigen landschaftspflegerischen oder gärtnerischen Maßnahmen in Parks, auf Friedhöfen, an Straßen- und Feldrändern, an Schienen- und Wasserstraßen, in Obstplantagen, Weingärten oder Privatgärten an. Durch die Notwendigkeit einer Entsorgung bietet sich die Aufarbeitung zu nutzbaren Brennstoffsortimenten an. Allerdings kann die Brennstoffqualität infolge erhöhter Verschmutzung (Aschegehalt) oftmals vermindert sein /3-17/.

Deutlich ungünstigere Brennstoffeigenschaften besitzen dagegen halmgutartige Brennstoffe aus der Landschaftspflege (vgl. hierzu Kapitel 4). Eine energetische Verwendung als Festbrennstoff in Kleinanlagen ist daher selten /3-27/.

3.1.4 Festbrennstoffe aus der Landwirtschaft

Brennstoffe aus der Landwirtschaft können entweder als Nebenprodukt anfallen oder sie werden speziell als Energiepflanzen produziert.

Nebenprodukte und Körner. Unter den Nebenprodukten stellen Stroh und Heu ein wichtiges bislang nahezu ungenutztes Brennstoffpotenzial dar. Der jährliche Energieertrag von einem Hektar Getreidestroh (ca. 5 t) entspricht etwa einem Heizöläquivalent von 2000 Litern (ca. 73 GJ).

Neben Stroh werden gelegentlich Abgänge der Saatgutreinigung (z. B. Bruchkorn) oder fehlgelagerte Körner als Brennstoff eingesetzt. In jüngster Zeit wird verstärkt auch die Verwendung von marktfähigem Getreide oder Rapssaat als Festbrennstoff diskutiert und auch teilweise schon praktiziert. Solche Aktivitäten verfolgen oft das Ziel, ein kostengünstiges Substitut für die relativ teuren Holzpellets zu verwenden. Allerdings treten bei einer solchen Körnerverbrennung in der Regel verschärfte technische Probleme auf (Kapitel 6.2.1.4). Ihre Verwendung ist außerdem rechtlich nicht ohne weiteres zulässig. Letzteres wird in Kapitel 8.4 angesprochen.

Energiepflanzen. Verschiedene Produktionsverfahren für speziell angebaute Energiepflanzen wurden in der Vergangenheit intensiv erprobt und zum Teil auch in Pilotvorhaben in die Praxis eingeführt. Hierunter ist beispielsweise Chinaschilf (Miscanthus sinensis) zu nennen, ein mehrjährig wachsendes, jährlich im Spätwinter zu erntendes Gras. Die Produktionskosten und -risiken sind aber immer noch sehr hoch, außerdem kommt eine Anwendung in kleineren Anlagen auf

Grund der ungünstigen Brennstoffeigenschaften zunächst kaum in Frage. Ähnliches gilt auch für Holz aus Kurzumtriebsplantagen (z. B. Pappeln oder Weiden), das in relativ extensiv bewirtschafteten, regelmäßig auf den Stock gesetzten und wieder austreibenden Dauerkulturen gewonnen werden kann. Auf Grund der geringen Relevanz für die hier betrachteten Kleinanlagen sollen Einzelheiten zu diesen Produktionsverfahren hier nicht vertieft werden (vgl. hierzu /3-16/, /3-18/, /3-19, /3-25/, /3-30/).

Unter den speziell angebauten Energiepflanzen hat bis heute lediglich der Raps für die Gewinnung von pflanzenölbasierten Kraftstoffen eine gewisse Bedeutung erlangt, wobei der Anbau sich nicht von der Erzeugung von konventionellem Raps unterscheidet. Der größte Teil der Rapssaat wird zu Treibstoffen für den mobilen Bereich umgewandelt (Rapsöl-Methylester als „Biodiesel“). Über die Gewinnung von naturbelassenem Rapsöl in Kleinanlagen sowie dessen Nutzung in Blockheizkraftwerken wird in Kapitel 10 berichtet.

3.1.5 Altholz

Altholz – z. T. korrekterweise auch als Gebrauchtholz bezeichnet – fällt am Ende einer bestimmten stofflichen Nutzung dort an, wo es aus dem Nutzungsprozess ausscheidet (z. B. bei Baumaßnahmen wie Gebäudeabbrüchen, Neubauten, Renovierungen oder auf Wertstoffhöfen). Auf Grund der sehr unterschiedlichen Nutzungsgeschichte kann derartiges Material vielfältig mit Fremdstoffen belastet sein. Allerdings kommen hier auch Sortimente vor, die unbedenklich sind, da es sich laut Altholzverordnung /3-4/ um Altholz der Klasse A I („naturbelassenes oder lediglich mechanisch bearbeitetes Altholz, das bei seiner Verwendung nicht mehr als unerheblich mit holzfremden Stoffen verunreinigt wurde”) handelt. Dieses Holz darf demnach auch in Kleinfeuerungen bis 1000 kW verwendet werden (vgl. hierzu Kapitel 8.4).

3.2 Bereitstellungsketten (Übersicht)

Die Holzwerbung im Wald und die Bereitstellung als ofenfertiges Scheitholz oder Hackgut erfolgt in einer Kette von Arbeitsschritten, die – zum Teil in geänderter Reihenfolge – wie folgt abläuft:

- Fällen
- Rücken (Sammeln)
- Trocknen
- Lagern des Rohholzes
- Zerkleinern (mit Sägen, Spaltern oder Hackern)
- Transport ins End- oder Zwischenlager
- Lagern des fertigen Brennstoffs.

Innerhalb dieses Verfahrensablaufes stellt das Rücken einen wesentlichen kostentreibenden Teilschritt dar. Größere Rückentfernungen sind daher nur dann sinnvoll, wenn das Brennholz noch gemeinsam mit dem Nutzholz vom Ort der Fällung (Hiebort) zu einem zentralen Aufbereitungsort transportiert wird, bevor es dort vom Nutzholz (z. B. Stammholz) getrennt wird. Wenn diese Abtrennung jedoch bereits am Hiebort stattfindet, wird grobes Stückholz (z. B. Rollen, Meterholz) oft bereits dort aufbereitet. Erntereste oder Ganzbäume können aber auch zur Rückegasse oder Waldstraße gerückt (d. h. transportiert) werden, vor allem wenn sie zu Hackschnitzeln weiterverarbeitet werden sollen. Größere Entfernungen von mehr als 40 bis 50 m sind allerdings kaum wirtschaftlich sinnvoll, insbesondere auf steilem Gelände.

Das eigentliche Rücken erfolgt entweder händisch oder mittels Seilwinde, gelegentlich auch mit dem Pferd. Für das manuelle Vorrücken liegen die Entfernungen bei der Erstdurchforstung kaum über 20 m. Bei späteren Durchforstungen erhöht sich das Gewicht des unzerkleinerten Holzes so sehr, dass der Zuzug nur noch mit Seilwinde oder Pferd möglich ist. Moderne Harvestermaschinen, die normalerweise für die Aufarbeitung zu Industrieholz verwendet werden, kommen dabei prinzipiell auch für die Brennholzgewinnung in Frage; die Reichweite des Kranauslegers solcher Maschinen liegt bei ca. 10 m.

Stückholz-Bereitstellungskette. Die Stückholzwerbung erfolgt entweder durch den Forstbetrieb, einen Lohnunternehmer oder durch private Nutzer, die zugleich auch Endverbraucher sein können und als „Selbstwerber“ das Fällen, Aufarbeiten, Ablängen, Rücken, Spalten, Sägen und Transportieren in Eigenregie übernehmen /3-15/ (vgl. hierzu Kapitel 3.3.1). Marktfähiges stückiges Brennholz wird bereits ab der Waldstraße an Selbstabholer zum Verkauf angeboten. Hierbei handelt es sich meist um einen teilaufbereiteten Brennstoff (z. B. gespaltenes oder ungespaltenes Meter- oder Zwei-Meterholz). Für die eigentliche Endzerkleinerung wird das Holz anschließend zu einer Hofstelle oder zum Endverbraucher transportiert. Das erfolgt meist mit Hilfe landwirtschaftlicher Fahrzeuge. Gewerbliche Anbieter erledigen das Sägen und Spalten meist unmittelbar vor dem Verkauf. Dadurch kann den Anforderungen der jeweiligen Abnehmer bzw. Feuerungstypen individuell begegnet werden. Aufbereitung, Verladung und Auslieferung können

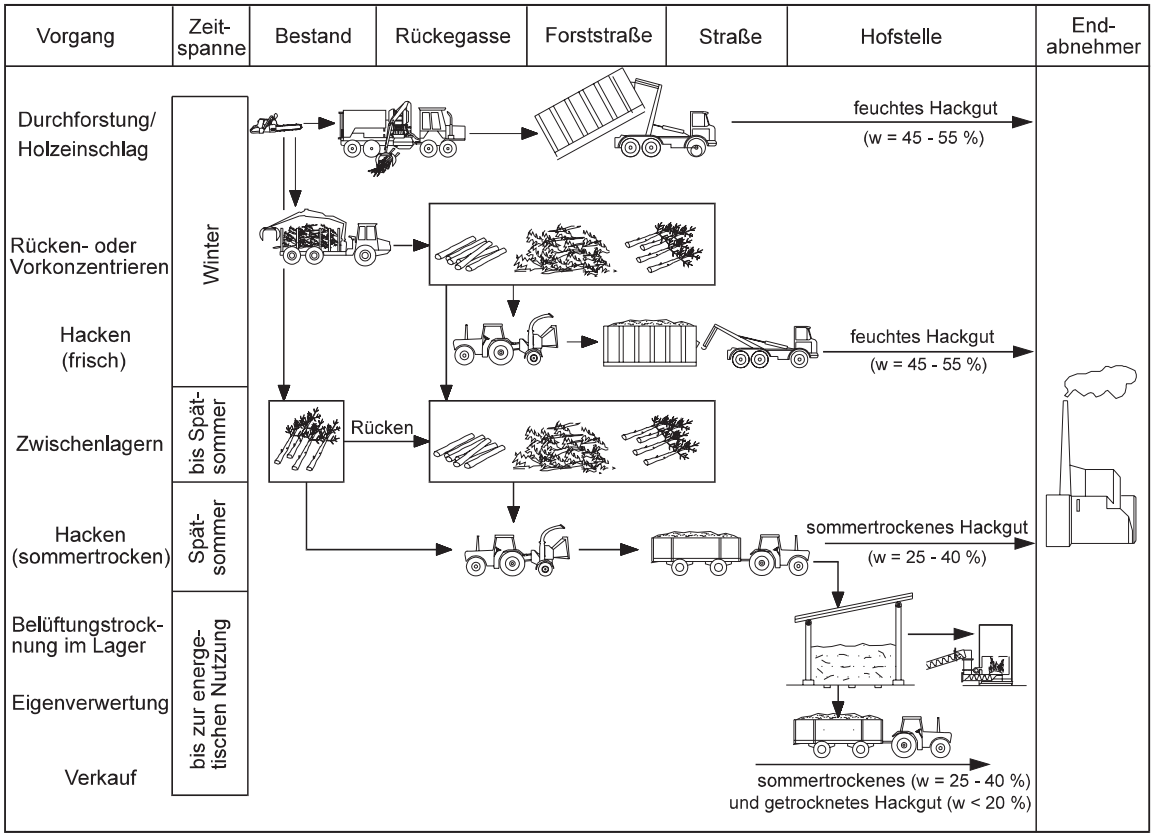


Abb. 3.3: Verfahrensketten zur Bereitstellung von Waldhackgut (Beispiele) /3-15/ (w Wassergehalt)

somit unmittelbar aufeinander folgend erledigt werden. Dabei sind Brennstofflängen von 25, 33, 50 und 100 cm üblich; es dominieren aber 33 cm Scheite (zweimal geschnittenes Meterholz) /3-15/ (zu den Techniken vgl. Kapitel 3.3.2).

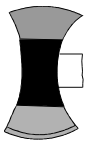
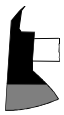
Für den Endverbraucher ist Scheitholz aus dem Wald auch ofenfertig in loser oder abgesackter Form, im Container oder auch folienverschweißt auf Einwegpaletten zu je etwa 2 Raummetern (Rm) verfügbar. Meterholz kann auch mit reißfesten Kunststoffbändern zu Bündeln von je einem Raummeter zusammengebunden werden, um das Laden und Umschlagen durch Kran- oder Gabelstapler zu erleichtern (Kapitel 3.3.2.4).

Hackschnitzel-Bereitstellungskette. Bei der Aufbereitung von Waldhackschnitzeln kommen sehr unterschiedliche Verfahrensabläufe zur Anwendung, die sich vor allem im Mechanisierungsgrad unterscheiden (d. h. motormanuelle, teilmechanisierte und vollmechanisierte Verfahren /3-19/). Dabei ist stets entweder eine Nutzung bestimmter Holzsortimente (z. B. nur des Schlagabraums oder des Stammes) oder auch eine Vollbaumnutzung möglich.

Vor der Aufbereitung sollten die gefällten Vollbäume bzw. der Schlagabraum über einige Monate im Bestand oder in der Rückegasse verbleiben, bis die Nadeln und Blätter abgefallen sind. Diese würden sonst den Wassergehalt erhöhen und die Pilzsporenbildung während der Hackgutlagerung fördern; außerdem enthalten Nadeln und Blätter relativ große Nährstoffanteile, die der Waldfläche nach Möglichkeit nicht entzogen werden sollten. Eine Zwischenlagerung nach dem Fällen hat aber auch den Vorteil, dass das Holz im belaubten Zustand schneller austrocknet als nach dem Blattabwurf, da ein Großteil des Wassers über die Nadel- und Blattmasse abgegeben wird. Bei Nadelholz kann diese Vorgehensweise in den Sommermonaten jedoch zu Forstschutzproblemen wegen der Gefahr des Borkenkäferbefalls führen. Wenn größere Holzmengen im Wald zwischenzulagern sind, sollte das Fällen im Herbst stattfinden, da das Holz dann bis zum Frühjahr so weit getrocknet ist, dass ein Käferbefall nicht mehr möglich ist.

Die letztendliche Ausgestaltung der Logistikkette wird wesentlich durch die Wahl des Ernte- und Aufbereitungsverfahrens bestimmt. Deren Vielfalt

Tabelle 3.2: Axttypen und ihre Verwendung bei der Brennholzwerbung

	Holzfälleraxt	Spalt-hammer	Spaltaxt	Universal-Spaltaxt	Universal-Forstaxt	Iltisaxt	Sappiaxt
Drauf- bzw. Seitenansicht							
Gewicht (nur Kopf)	2,1 kg	2,5 - 3,5 kg	1,3 - 2,8 kg	2,5 - 2,8 kg	1,2 kg	0,8 - 1,0 kg	1,2 kg
übliche Stiellänge	80 - 90 cm	80 - 85 cm	45 - 80 cm	80 cm	64 - 70 cm	65 cm	65 cm
Verwendung	Fällaxt (hier: beidseitig)	Spalten von großem, knorrigem Holz, Treiben von Keilen	Holzspalten	Holzspalten, Treiben von Keilen	auch zum Treiben von Keilen, Entasten, Spalten	speziell zum Entasten	Kombination aus Forstaxt und Sappi

bedingt eine große Zahl möglicher Verfahrensabläufe. In Abb. 3.3 sind exemplarisch einige typische Bereitstellungsketten dargestellt; sie lassen sich um viele Varianten erweitern /3-45/. Die Techniken für die Hackschnitzelproduktion werden in Kapitel 3.3.3 besprochen.

3.3 Ernte und Aufbereitung

3.3.1 Brennholzwerbung im Wald

Die Arbeiten der Brennholzwerbung im Wald werden sowohl von betrieblichen und gewerblichen Kräften als auch von sogenannten Selbstwerbern, d. h. von Privatpersonen durchgeführt. Das Holz selbst ist zum Teil sogar kostenlos, es wird aber nur an zuverlässige Personen vergeben, da mit der Brennholzwerbung auch Aufgaben der Waldpflege erfüllt werden.

Ein Selbstwerber erhält vom Waldbesitzer oder von der Forstverwaltung eine bestimmte Fläche, das sogenannte „Flächenlos“, zugewiesen. Auf einem solchen Flächenlos sind die für die Brennholzaufbereitung freigegebenen Bäume von einem Förster für das Fällen bereits markiert. Daneben können auch Flächen zugewiesen werden, auf denen sich aufarbeitungsfähiges Holz als Rückstand der Nutzholzernte („Schlagabraum“) befindet. Das Fällen dieser Bäume geschieht mit der Motorsäge. Außerdem werden bei Forstarbeiten eine Axt und weitere Ausrüstungsgegenstände benötigt. Sie werden nachfolgend beschrieben.

3.3.1.1 Die Axt

Für die verschiedenen Einsatzzwecke werden unterschiedliche Äxte angeboten. Bei der Arbeit im Forst kommen vor allem die Universal-Forstaxt, die Iltisaxt und die Sappiaxt in Frage (Tabelle 3.2), da diese Äxte leicht sind und für das Entasten verwendet werden können. Die Sappiaxt besitzt einen Sappihaken, um schwächeres Holz zu wenden oder vorzuliefern. Die Holzfälleraxt wird dagegen heute außer bei Holzfällermeisterschaften kaum noch benützt. Bei häufigen Keilarbeiten oder wenn das Holzspalten bereits im Wald manuell erfolgen soll sind andere, schwerere Axttypen vorteilhafter (Tabelle 3.2), während eine normale Spaltaxt oder eine Iltisaxt hierbei leicht beschädigt und unbrauchbar werden kann.

Bei der Wahl der Axt ist auch auf den richtigen Stiel zu achten. Er ist aus Eschen- oder Hickoryholz, bei Spezialäxten auch aus Vinyl. Die Stiellänge wird individuell abgestimmt, sie sollte ungefähr gleich der Armlänge sein. Je größer die Kraftausübung sein soll, desto länger ist der Stiel.

3.3.1.2 Die Motorsäge

Die Motorsäge (Kettensäge) ist das Standardgerät der Brennholzgewinnung. Die wichtigsten Merkmale und Sicherheitsaspekte werden nachfolgend beschrieben.

Motorsägenausstattung. Für den Selbstwerber kommen Motorsägen mit einer Leistung im Bereich 1,5 bis 3 kW in Frage. Diese Sägen sind mittlerweile serienmäßig mit einer elektronischen Zündanlage, einer Kettenbremse und einer automatischen Kettenschmie-

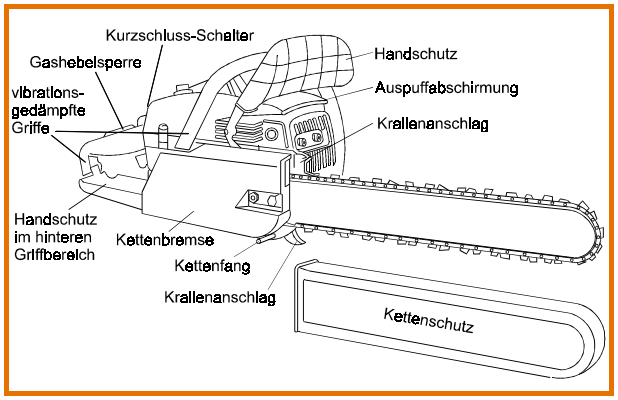


Abb. 3.4: Sicherheitsmerkmale einer Motorkettensäge

rung ausgestattet. Die empfohlene Schwertlänge liegt bei 30 bis 40 cm. Beim Erwerb einer Kette sollte man darauf achten, dass es sich um eine Sicherheitskette handelt, welche die Rückschlaggefahr der Motorsäge vermindert. Wenn ältere Motorsägen verwendet werden, sollte darauf geachtet werden, dass bestimmte Sicherheitsmerkmale erfüllt sind (Abb. 3.4), hierzu zählen:

- Antivibrationsgriffe
- Sicherheitskette (reduzierte Rückschlaggefahr)
- Schutzköcher (verhindert Verletzungen an der scharfkantigen Kette beim Transport)
- Gashebelsperre (verhindert eine Gefährdung durch ungewolltes Gasgeben)
- Kettenfangbolzen (ist am Ketteneinlauf montiert und fängt eine gerissene Kette auf)
- Kettenbremse (bietet Schutz, falls die Säge unerwartet nach oben ausschlägt. Diese Gefahr besteht vor allem, wenn versucht wird, mit der Schienenspitze zu sägen.)

Zur weiteren Ausstattung einer Motor-Kettensäge gehören außerdem

- ein Kombinationsschlüssel zum Wechseln der Zündkerze und zum Kettenspannen,
- eine Feile zum Nachschärfen der Kette (mit Feilhilfe),
- ein Doppelkanister für Kraftstoff und Kettenschmieröl.

Treib- und Schmierstoffe. Als Treibstoff wird ein Benzin-Öl-Gemisch für Zweitaktmotoren verwendet. Es wird im Handel auch als Fertigmischung angeboten. Diese werden im Waldboden schnell abgebaut und sind weitgehend frei von gesundheitsschädigenden Stoffen wie Benzol und anderen Aromaten. Allerdings liegt der Preis etwa doppelt so hoch wie für konventionelle Zweitakt-Benzinmischungen.

Das verwendete Sägekettenöl sollte aus biologisch abbaubarem Pflanzenöl sein. Beispielsweise kann hierfür naturbelassenes Rapsöl – auch ohne Additivierung – verwendet werden, ohne dass hinsichtlich der Schmiereigenschaften mit Nachteilen gegenüber mineralischem Schmieröl zu rechnen ist /3-46/. Eine Additivierung ist jedoch erforderlich, wenn das Öl oder die Säge bei Temperaturen um oder unter minus 10 °C gelagert wird. Bei derartigen Schmierölen sollte außerdem der Schmieröltank bei mehrtägigem Stillstand stets aufgefüllt sein. Nach der Brennholzwerbung sollte das Pflanzenöl nicht über längere Zeit im Schmieröltank verbleiben, da es zu Verharzungen neigt. Auch der Treibstofftank sollte dann entleert werden, da der Kraftstoff Wasser anreichert, das den Startvorgang behindert. Nach der Tankentleerung sollte der Moter laufen, bis er abstirbt.

Betrieb und Handhabung. Kettenspannung und Kettenschärfe sollten während der Forstarbeiten zwischendurch kontrolliert werden, hierzu zählt auch das Überprüfen und Reinigen des Luftfilters.

Da die Arbeiten mit der Kettensäge mit einem hohen Unfallrisiko verbunden sind, ist es für Selbstwerber sinnvoll, den richtigen Umgang mit der Säge und die dazugehörenden Unfallverhütungsvorschriften z. B. in einem Wochenend-Lehrgang zu erlernen. Derartige Lehrgänge werden von den Forstämtern, den Landwirtschaftlichen Berufsgenossenschaften oder von Waldbauerschulen angeboten.

3.3.1.3 Die weitere Ausrüstung

Zu einer vollständigen Ausrüstung für Holzerntearbeiten gehört eine zweckmäßige Bekleidung. Das gilt auch, wenn nur Bäume mit geringem Umfang gefällt werden. Für jegliche Kettensägenarbeit benötigt man eine sogenannte Schnittschutzhose. Diese spezielle Hose enthält Fasern, welche die umlaufende Kette einer Motorsäge bei versehentlichem Kontakt sofort zum Stillstand bringen. Ein Schutzhelm mit Gehör- und Gesichtsschutz, Arbeitshandschuhe und Schuhe mit Schnittschutzeinlagen sowie gut sichtbare Kleidung sind ebenfalls vorgeschrieben (Abb. 3.5) /3-53/.

Zur Komplettierung der Ausrüstung können – je nach Standort und Baumbestand – außerdem ein Fällheber, mehrere Fällkeile, ein Hebehaken, ein Sappi, eine Handpackzange, ein Wendehaken und ein Hebelfällkarren erforderlich sein (Abb. 3.6).

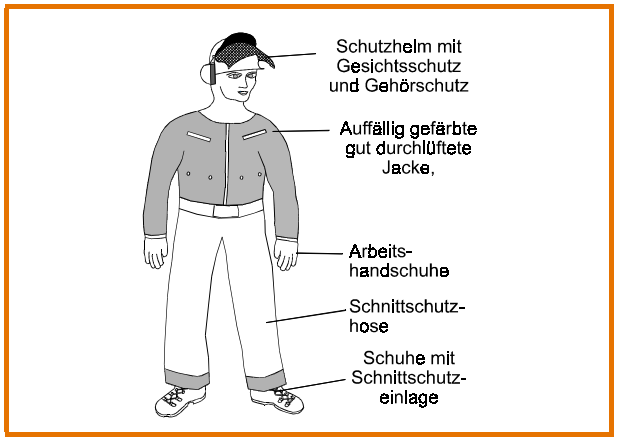


Abb. 3.5: Schutzausrüstung für die Waldarbeit

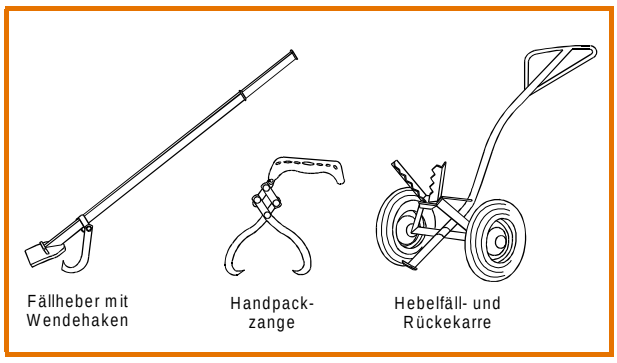


Abb. 3.6: Hilfsmittel für das Fällen und Rücken

3.3.1.4 Arbeitsablauf und Arbeitssicherheit

Das Fällen. Für den gewählten Baum wird zunächst die Fällrichtung ausgewählt. Lücken bei den umstehenden Bäumen sind hierfür geeignet, da sie Fällschäden vermeiden. Bei Fällarbeiten am Hang fällt man die Bäume quer zum Hang. Die Arbeiten sollten grundsätzlich nie alleine durchgeführt werden. Um die Gefährdung von Personen und Gegenständen zu vermeiden, ist die Höhe des Baumes zu schätzen damit der spätere Liegebereich und damit die Gefahrenzone abgeschätzt und gesichert werden kann. Die Gefahrenzone entspricht dem doppelten Bereich der Baumlänge (Abb. 3.7), darin darf sich niemand aufhalten, der sich nicht mit dem Fällen beschäftigt. Die Rückzugswege (schräg nach hinten) sollten offen sein, etwaige Hindernisse müssen vor dem Fällen entfernt werden. Vor Beginn des Trennschnitts schafft man sich einen geeigneten Arbeitsraum indem eventuelle Äste am Stamm mit der Axt entfernt werden und der Stammfuß von Bewuchs oder Steinen befreit wird. Beim anschließenden Schnitt werden die nachfolgenden Techniken angewendet:

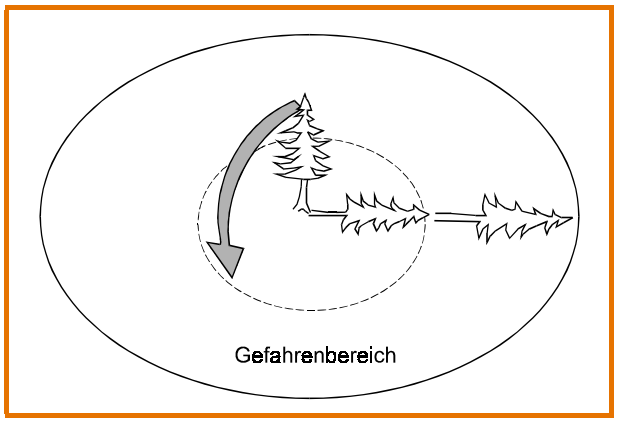


Abb. 3.7: Gefahrenbereich beim Baumfällen /3-53/

- *Schräger Sägeschnitt.* Für die Bäume mit kleinerem Durchmesser (unter 15 cm), die in einem dichten Bestand eng aneinander stehen, benötigt man zum Fällen keinen Fallkerb. Diese Bäume sägt man auf einmal mit einem schrägen Sägeschnitt durch. Dazu stellt man sich ausnahmsweise in Fällrichtung vor den Baum. Der Stamm rutscht über das Sägeschwert der Motorsäge.
- *Waagerechter Fällschnitt.* Ebenfalls für Bäume mit kleinerem Durchmesser (unter 15 cm) kann ein waagerechter Fällschnitt angewendet werden. Zunächst sägt man dabei einen einfachen Einschnitt (Gegenschnitt) anstatt eines Fallkerbs. Dann erfolgt der Fällschnitt in Höhe des Gegenschnitts oder etwas darunter; dabei wird oft eine zweite Person benötigt, die den Baum aus einem ausreichenden Sicherheitsabstand (Gefährdung durch Motorsäge!) mit einer Schubstange in die vorgesehene Fällrichtung drückt .
- *Fällen mit Fällheber.* Bei schwachem Holz (bis 25 cm BHD) wird auch ein Fällheber eingesetzt, mit dem versucht wird, den noch stehenden Baum mit Hebelkraft umzudrücken. Dabei wird zunächst ein kleiner Fallkerb oder ein einfacher Gegenschnitt angelegt. Es folgt ein erster Fällschnitt mit auslaufender Kette bis zur Bruchleiste; die Tiefe des Schnitts beträgt maximal 2/3 des Stammdurchmessers. Dann wird der Fällheber in den Schnitt gesetzt. Der zweite Fällschnitt wird nun schräg unterhalb des ersten Fällschnitts von der Gegenseite angesetzt, damit das Schwert nicht mit dem Fällheber zusammentreffen kann. Mit einlaufender Kette wird nun im verbliebenen Stammdrittel bis zur Bruchleiste gesägt. Anschließend wird die Säge zur Seite gelegt und der Baum mit dem Fällheber in die vorgesehene Richtung gekippt.
- *Fällen mit Fallkerb.* Bei stärkeren Bäumen ab einem Brusthöhendurchmesser (BHD) von ca. 20 cm wird ein Fallkerb angelegt. Dazu wird zunächst die Fallkerbsohle und danach das Fallkerbdach gesägt

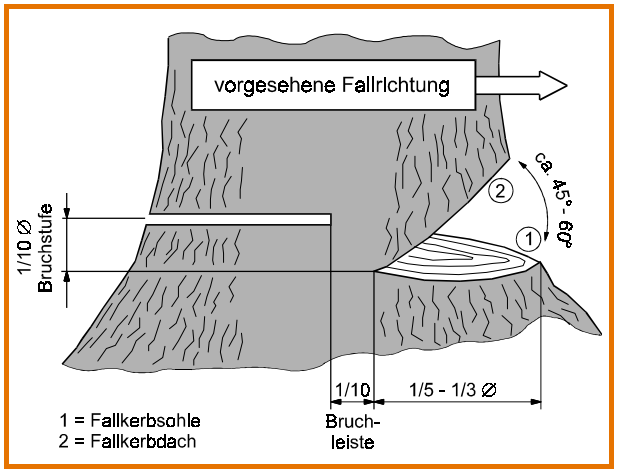


Abb. 3.8: Fällschnitt mit Fallkerb (ab BHD >20 cm) /3-53/

(Abb. 3.8). Dann wird die beabsichtigte Fallrichtung überprüft und ggf. entsprechende Korrekturen am Fallkerb vorgenommen. Bei der Überprüfung orientiert man sich entweder am Motorsägenbügel, der im 90° Winkel zum Schwert steht und somit in Fallrichtung zeigt. Der anschließende Fällschnitt liegt mindestens 3 cm über dem Schnitt der Fallkerbsohle. Er wird waagerecht geführt. Damit die Säge nicht eingeklemmt wird, treibt man Keile in den Fällschnitt. Beim Sägen lässt man eine Bruchleiste stehen, die den Baum beim Umfallen wie ein Scharnier in die gewünschte Richtung lenkt. Im Normalfall steht der Baum noch und wird nun durch weiteres Vorantreiben der Keile zu Fall gebracht; er wird folglich umgekeilt, nicht umgesägt. Dabei wird die Krone beobachtet, um die Fallrichtung zu kontrollieren und herunterfallende trockene Äste zu bemerken. Sobald der Baum fällt, weicht man schräg nach hinten zurück.

Vollständiges Umlegen von „Hängern". Hat sich ein Baum beim Fällvorgang in einem anderen Baum verhackt, bieten sich in jüngeren Beständen mit Bäumen bis 20 cm Brusthöhendurchmesser verschiedene Möglichkeiten an, mit denen ein vollständiges Umfallen bewirkt werden kann:

- Mit einem Wendehaken (auch kombiniert mit Fällheber) kann nach dem Absägen der Bruchleiste versucht werden, den Baum durch Drehen abzutragen.
- Eine Hebelfällkarre kann unten an der Schnittfläche angelegt werden; der hängende Baum wird dann nach oben gehebelt und gleichzeitig nach hinten gerollt, bis der Baum fällt.
- Der Hänger kann mit dem Sappi (vgl. Tabelle 3.2) vom Stock gehebelt werden.
- Er kann mit einem Seilzug oder einer Seilwinde vom Stock abgezogen werden.

Aus Sicherheitsgründen sollte bei diesen Maßnahmen der hängende Baum nie bestiegen werden, und auch das Absägen hindernder Äste oder gar des aufhaltenden Baums darf nicht erfolgen. Außerdem sollte man sich nie unter dem Hänger aufhalten.

Aufarbeiten. Zunächst wird beim Aufarbeiten mit dem Entasten begonnen. Das geschieht mit der Säge oder mit der Axt. Die benötigte Axt ist ungefähr 1 kg schwer und besitzt am Stiel einen Knauf, der das Abrutschen erschwert (Kapitel 3.3.1.1). Aus Sicherheitsgründen sollte immer nur eine Person an einem Baum arbeiten, und die Axt sollte sich immer vom Körper weg bewegen. Es wird vom Stamm zum Zopf gearbeitet, wobei man den Stamm immer zwischen sich und der Axt haben sollte (Sicherheit vor abprallenden Axthieben).

Beim Entasten mit der Motorsäge muss ein sicherer Stand vorliegen. Um unnötigen Kraftaufwand zu vermeiden, wird die Säge am Stamm angelehnt. Bei Bäumen mit dicken, stark verzweigten Ästen ist es oft zweckmäßig, diese von außen nach innen und von oben nach unten schrittweise zu kürzen. Generell wird aber mit der Säge so nah wie möglich am Stamm gearbeitet. Unter Spannung stehende Äste können die Säge einklemmen, solche Äste sägt man daher mit einem Schmälerungsschnitt zunächst von der Druckseite an (Abb. 3.9). Danach folgt der Trennschnitt auf der Zugseite. Da die Gefahr besteht, dass der Baum oder der Ast hochschlägt, ist der Standplatz während des Sägens immer auf der Druckseite.

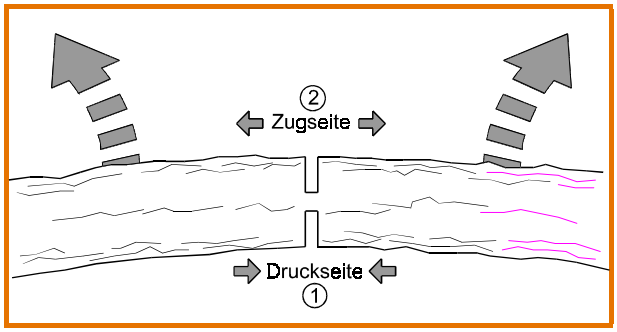


Abb. 3.9: Sägeschnittreihenfolge bei Spannungen im Holz /3-53/

Ablängen. Nach der Aufarbeitung werden die Stämme oder Äste auf ein einheitliches, von Hand rückbares und ggf. verkaufsfähiges Maß (z. B. 1 Meter) zugeschnitten („abgelängt"). Hierfür werden die

vorgesehenen Schnitte oft mit einem Reißmeter vorher angerissen, oder es werden während des Ablängens geeignete Messhilfen mit der Motorsäge mitgeführt (z. B. fester Meterstab). Das gilt vor allem für verkaufsfähiges Holz.

Auch liegendes Holz kann beim Ablängen unter Spannung stehen, daher ist die Arbeitsweise in diesem Fall ähnlich wie beim Aufarbeiten (erst Druckseite ansägen, dann Zugseite). Das Schneiden in den Waldboden ist zu vermeiden, da die Kette hierbei sehr schnell stumpf wird.

Das Holz liegt nun fertig abgelängt im Wald. Mit einem Hebehaken, einer Handpackzange oder einer Seilwinde kann es nun an den Forstweg gezogen werden.

3.3.2 Scheitholzaufbereitung

Die Scheitholzaufbereitung folgt auf die Brennholzwerbung im Wald (Kapitel 3.3.1), bei der der aufgearbeitete Rohstoff (Stangen, Meterholz, Klötze) für die eigentliche Zerkleinerung zur Verfügung gestellt wird. Die Aufbereitung umfasst das erneute Sägen, das Spalten und den Umschlag der Scheite.

3.3.2.1 Sägen

Kettensägen. Bei der Scheitholzaufbereitung spielen die Kettensägen, die das Haupthilfsmittel für die Brennholzwerbung im Wald darstellen, nur noch eine untergeordnete Rolle. Neben den benzinbetriebenen Motorsägen, die in Kapitel 3.3.1.2 ausführlich beschrieben sind, werden bei der stationären Aufbereitung auch ortsgebundene elektrische Kettensägen verwendet. Diese sind einerseits leiser als Benzinmotorsägen, so dass sie auch für die Holzaufbereitung in Siedlungsnähe einsetzbar sind, zum anderen sind sie abgasfrei und eignen sich daher auch für Arbeiten in geschlossenen Räumen. Für diese Sägen wird ein normaler elektrischer Anschluss mit 230 V benötigt; die Leistungsaufnahme liegt zwischen 1,4 und 2,2 kW und das Gewicht zwischen 3 und 5 kg. Die Schwertlänge beträgt 30 bis 40 cm. Für Brennholzarbeiten ist eine Elektro-Kettensäge mit 1,8 kW Leistung, 4 kg Gewicht und 35 cm Schwertlänge empfehlenswert.

Kreissägen. Für die Brennholzaufbereitung werden Tischkreissägen, Rolltischkreissägen, Wippkreissägen oder Kombinationen dieser Typen verwendet. Kleinere Sägen haben einen 3,0 kW Wechselstrommotor (230 V Wechselstrom), sie sind aber nur bedingt für die Brennholzaufbereitung geeignet. Die meisten Kreissägen arbeiten daher mit 400 V Drehstrommotor, so dass Anschlussleistungen von 4,2 bis 7,5 kW möglich sind. Außerdem kann der Antrieb auch mit einer Traktorzapfwelle erfolgen. Als Sägeblätter werden Durchmesser von 315 bis 800 mm verwendet, die Blattdicke variiert zwischen 1,8 und 3,2 mm. Eine für Brennholzarbeiten typische Ausrüstung stellt beispielsweise eine Wipp-Tischsägenkombination mit optionalem Zapfwellenantrieb, 5,5 kW Motor (400 V Drehstrom); 700 mm Blattdurchmesser und 3 mm Blattdicke dar. Eine Liste mit Anbietern solcher Sägen bietet Anhang A.

Bei der Arbeit mit der Kreissäge treten Lärmbelastungen von über 90 dB(A) auf, daher ist das Tragen eines Gehörschutzes notwendig.

Bandsäge. Bei einer Bandsäge rotiert ein flexibles Sägeband, das um zwei Räder gespannt ist. Die Vorteile einer Bandsäge liegen in der dünnen Schnittbreite, dem sauberen Schnitt und in der Möglichkeit, Bogen- oder kurvenförmige Schnitte anzubringen. Im Brennholzbereich ist dieser Sägentyp inzwischen selten geworden. Er wurde früher in fahrbaren Brennholzsägen verwendet, die von Lohnunternehmern zu den Sägeplätzen gefahren wurden.

3.3.2.2 Spalten

Das Spalten von Holz wird weltweit immer noch zu einem großen Teil in Handarbeit erledigt. Mittlerweile werden aber in Mitteleuropa zunehmend rationellere und höher mechanisierte Verfahren angewendet. Nachfolgend werden die Verfahren vorgestellt. Eine Herstellerübersicht zu den verschiedenen maschinellen Spaltertypen und -bauarten bietet Anhang A.

Manuelles Spalten. Für das manuelle Spalten werden Spaltäxte und Spalthammer mit dazugehörigen Keilen verwendet. Eine Übersicht über die gängigen Axttypen wird in Kapitel 3.3.1.1 (vgl. Tabelle 3.2) vorgestellt.

Bei großen Klötzen ist ein Spalthammer mit seinem großen Gewicht zu empfehlen, das gilt bei Weich- und Hartholz. Bei kleineren Klötzen, die man mit einem Schlag spalten kann, wird die leichtere Spaltaxt verwendet. Für Hartholz wird eine etwas dickere Klinge als für Weichholz gewählt. Oft sind Spaltäxte aber für beide Holzarten geeignet. Viele Spaltäxte werden aber beim Treiben von Keilen leicht beschädigt und unbrauchbar, wenn es sich nicht um ein ausdrücklich auch für diesen Zweck geeignetes Werkzeug handelt.

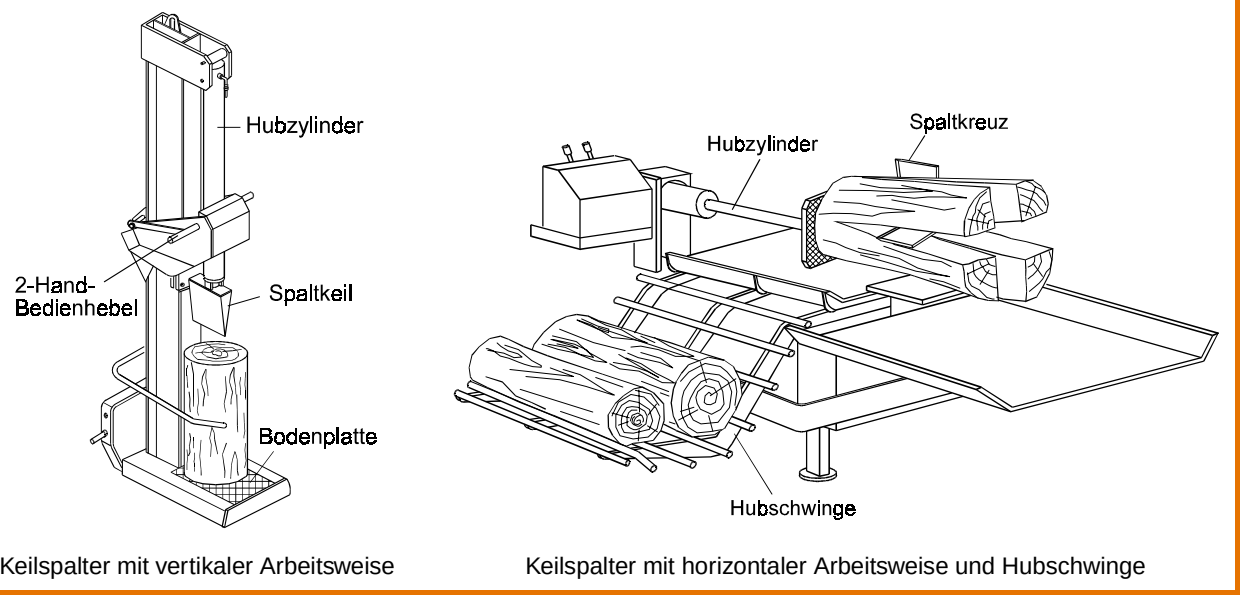
Tabelle 3.3: Merkmale verschiedener Bauarten von Holzspaltgeräten (Eine Liste mit Anbietern bietet Anhang A.)

Bauart	max. Holzlänge (cm)	max. Holzdurchmesser (cm)	Antriebsart	Leistung (kW)	mögliche Beschickungshilfe
Keilspalter, stehend	55 - 110	35 bis unbegrenzt	- Hydraulikmotor über Schlepperzapfwelle - Hydraulikmotor mit Elektroantrieb	1,5 - 22	Hubschwinge
Keilspalter, liegend	40 - 200	40 bis unbegrenzt	- Schlepperhydraulik direkt	2,2 - 30	Seilzug und Seilwinde
Spiralkegelspalter	50 - 120	35 – 100	- Direktantrieb über Schlepperzapfwelle - Elektromotor direkt	4 - 15	
Rotationskeilspalter	60	18	- Schlepperzapfwelle direkt	25	

Mechanische Keilspalter. Für die gewerbliche Zerkleinerung bzw. Spaltung von gerücktem Holz zu ofengängigen Holzstücken kommen hauptsächlich Keilspalter zum Einsatz. Sie sind vielfach als Schlepperanbaugeräte mit Zapfwellenantrieb ausgeführt (Tabelle 3.3).

Beim Keilspalter wird ein Spaltkeil hydraulisch über einen Hubkolben in das eingeklemmte Holz getrieben. Alternativ kann der Rohling auch gegen einen fest stehenden Keil oder eine Klinge gedrückt werden; dann wird nicht der Spaltkeil, sondern die gegenüberliegende Druckplatte bewegt, wobei Spaltdrücke von 5 bis 30 t aufgewendet werden. Beide Bauarten werden sowohl bei vertikal als auch bei horizontal arbeitenden Geräten eingesetzt (Abb. 3.10). Der Spaltkeil kann auch als Spaltkreuz oder Mehrfachspaltklinge ausgestaltet sein. Dadurch können mit einer einzigen Hubbewegung bis zu 8 Scheite gleichzeitig erzeugt werden. Mehrfachspaltklingen werden vor allem bei größeren Holzdurchmessern verwendet; hier überwiegt eine horizontale Arbeitsweise. Bei einigen Horizontalspaltern ist vor jedem Arbeitsgang zusätzlich eine Höhenanpassung der Mehrfachspaltklinge möglich. Dadurch wird sichergestellt, dass auch bei wechselnden Durchmessern stets die Mitte des Holzquerschnitts angesteuert wird, um so eine gleichmäßige Scheitstärke sicherzustellen.

Bei größeren Holzdurchmessern kann eine Beschickungshilfe nützlich sein. Leistungsstarke vertikal arbeitende Keilspalter werden daher gelegentlich mit Greifzange und Seilwinde ausgerüstet, um das Heranrücken schwerer Holzstücke zu erleichtern. Bei Spaltern mit liegender Zerkleinerung werden Hubschwingen eingesetzt. Eine oder mehrere unzerkleinerte Holzrollen werden dabei auf die heruntergelassene Schwinge geladen und anschließend



Keilspalter mit vertikaler Arbeitsweise — Keilspalter mit horizontaler Arbeitsweise und Hubschwinge

Abb. 3.10: Bauarten von Keilspaltern /3-19/

hydraulisch auf eine Höhe angehoben, von wo aus sie sich leicht in den Spalter hineinrollen lassen (Abb. 3.10, rechts).

Die Durchsatzleistung derartiger Geräte hängt von der Zahl der Bedienpersonen, der Bauart und Spaltkraft des Gerätes, der Holzart, dem Holzzustand und von der Vor- und Rücklaufgeschwindigkeit des Spaltwerkzeugs ab. Unter günstigen Voraussetzungen können ca. 3 bis 5 Rm/h gespalten werden /3-5/.

Keilspalter sind die bei weitem am häufigsten eingesetzte Spalterbauart. Ihr Platzbedarf ist verhältnismäßig gering. Bei der Aufstellung sind die in Abb. 3.12 dargestellten Richtwerte für den benötigten Arbeitsraum zu berücksichtigen.

Spiralkegelspalter. Bei diesen Geräten wird das Holz an einen rotierenden Spiralkegel gedrückt, der direkt von einer Schlepperzapfwelle oder von einem Elektromotor angetrieben wird. Der Kegel besteht aus spiralförmigen Windungen, die sich selbsttätig in das arretierte Holzstück hineinbohren und dieses in Faserlängsrichtung aufspalten (Abb. 3.11). Da für die Kraftübertragung keine Hydraulikanlage erforderlich ist, kann die Gerätetechnik stark vereinfacht werden. Allerdings ist das Unfallrisiko vergleichsweise hoch. Am häufigsten kommen diese Geräte als Zusatzfunktion zu einer Kreissäge, an deren Antriebsachse auch der Spiralkegelspalter angeschlossen wird, zum Einsatz. Bei einer solchen kombinierten Anwendung liegt der maximale Durchmesser der Holzblöcke bei ca. 30 cm. Spiralkegelspalter haben bisher nur eine begrenzte Verbreitung gefunden.

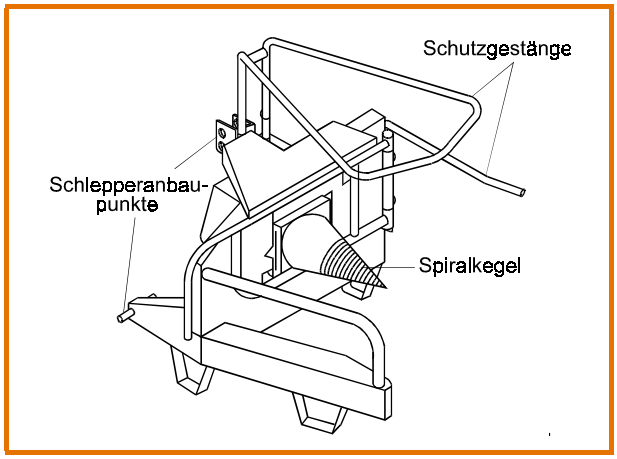


Abb. 3.11: Spiralkegelspalter /3-19/

Messerradspalter. Diese hauptsächlich in Skandinavien eingesetzten Geräte erledigen das Spalten und Schneiden in einem Arbeitsgang. Der Spaltkeil wird

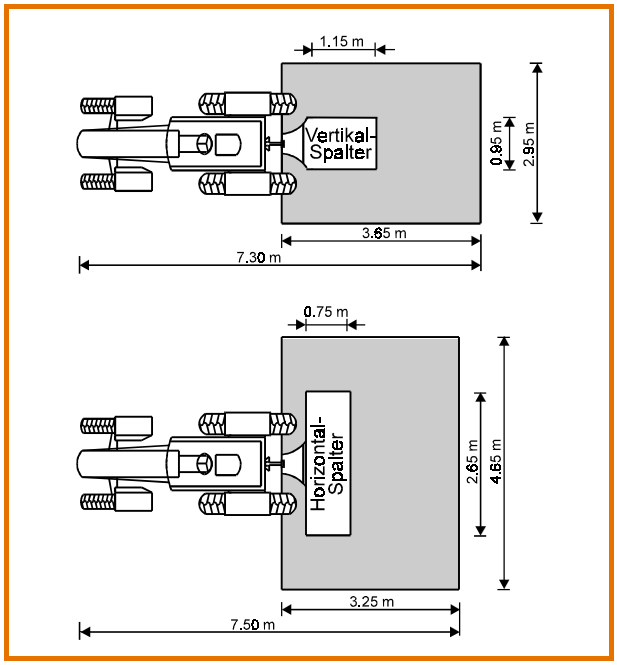


Abb. 3.12: Typischer Platzbedarf beim Arbeiten mit Vertikal- und Horizontalspaltern für die Holzaufbereitung

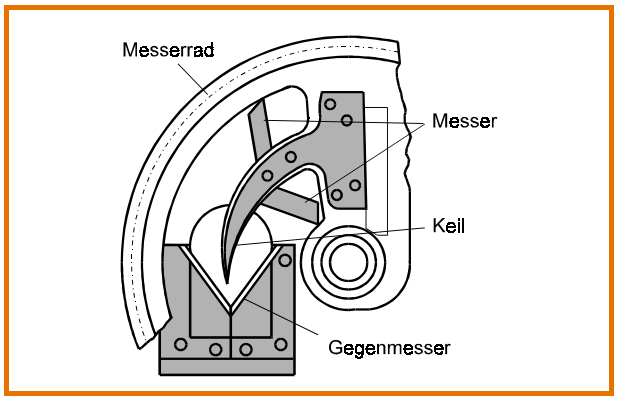


Abb. 3.13: Messerradspalter (nach BGU /3-2/)

längsseits von der Rindenseite in das Holz hineingetrieben. Mit der gleichen Bewegung wird das aufgespaltete Holz durch zwei weitere, versetzt angebrachte Schneidmesser vom Rest der Stange abgeschnitten (Abb. 3.13). Die Werkzeuge sind dabei an einem rotierenden, nach innen offenen Messerrad angebracht. Über eine Beschickungsrinne wird Stangenholz von Hand nachgeschoben, sobald sich das Messerrad in die dafür geeignete Position gedreht hat. Der Kraftbedarf für das rechtwinklige Abscheren des Holzes ist allerdings hoch. Daher lassen sich hiermit lediglich Holzstärken bis 18 cm Durchmesser verarbeiten.

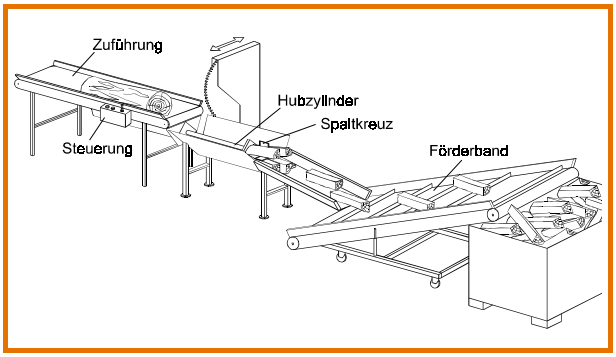


Abb. 3.14: Funktionsweise einer kombinierten Säge-Spaltmaschine (schematisch)

3.3.2.3 Kombinierte Säge-Spaltmaschinen

Inzwischen werden auch zahlreiche kombinierte Systeme angeboten, mit denen das Holz in zwei aufeinanderfolgenden Arbeitsgängen gesägt und gespalten wird (sogenannte „Brennholzmaschinen“, Abb. 3.14). Das Rohholz, das einen Durchmesser von bis zu 30 cm haben kann, wird von Hand oder über ein Ketten- oder Gummiförderband bis zur einstellbaren Anschlagplatte vorgeschoben und mit Hilfe eines Kreissägeblatts abgetrennt. Danach fällt der Holzblock in eine Spaltrinne, wo der Spaltvorgang manuell ausgelöst wird. Die fertigen Scheite werden meist auf ein Transportförderband übergeben. Auf Grund der hohen Durchsatzleistungen finden solche Maschinen primär bei kommerziellen Brennholzaufbereitern ihre Einsatzfelder.

3.3.2.4 Stapel- und Umschlagshilfen

Nach dem Sägen und Spalten muss das aufbereitete Scheitholz gesammelt, transportiert, umgeschlagen und eingelagert werden. Dies geschieht häufig manuell, oder es werden herkömmliche Geräte oder Transportmittel (Förderbänder, Anhänger etc.) verwendet. Speziell für Scheitholz werden aber auch besondere Stapel- und Umschlagshilfen angeboten. Beispiele dieser Geräte werden nachfolgend dargestellt.

Stapelrahmen. Der Stapelrahmen (Abb. 3.15) besteht aus einem U-förmigen Metallrahmen (meist ca. 1 m x 1 m). In diesen Rahmen werden zunächst mehrere Gewebe- oder Stahlbänder bzw. Spanngurte eingelegt, mit denen das Holz nach dem Aufstapeln zusammengezurrt werden soll. Danach werden die Scheite (meist Meterholz) aufgeschichtet. Nun werden die Bänder gespannt und fest verknüpft bzw. verklemmt. Anschließend kann der Stapel an den Bändern hängend (z. B. mit dem Frontlader) zur Lagerstätte oder zum Transportfahrzeug transportiert werden. Gelegentlich werden diese Bunde auch beim Abnehmer mit einer speziellen Motorsäge, die ein extra langes Schwert besitzt, noch im gebundenen Zustand auf die gewünschte Scheitlänge zersägt.

Stapelrad. Auch mit dem Stapelrad wird Scheitholz gebündelt. Dazu legt man den Spanngurt oder das Bindegarn in das Stapelrad bevor das Scheitholz im Rahmen eingestapelt wird. Der Stapel wird nun verzurrt. Nun kann man das Stapelrad teilen, indem die obere Hälfte abgetrennt wird. Der Stapel wird abschließend mit der unteren Hälfte des Stapelrades zur Seite gerollt (Abb. 3.16). Das Stapelrad gibt es in verschiedenen Größen für Scheitholzlängen von 25 cm bis 2 m. Der Vorteil des Stapelrads gegenüber dem Stapelrahmen liegt in seinem geringerem Umfang auf Grund der runden Form (ca. 3,5 m) gegenüber dem Stapelrahmen (ca. 4 m), bei gleichem Rauminhalt. Dadurch lässt sich der Stapel fester zusammenzurren.

Stückholz Bindeapparate. Für noch höhere Mechanisierungsgrade sind verschiedene Bindeapparate erhältlich, mit denen auch gestapelte Scheitbündel aus 50- oder 33-cm-Scheiten „geschnürt“ werden können. Mit einer Wendeplatte ist es möglich, die Bündel zu

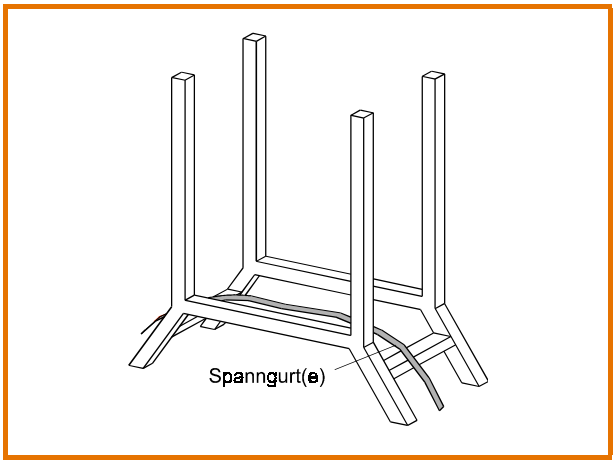


Abb. 3.15: Stapelrahmen für Holzbunde (z.B. je 1 Rm)

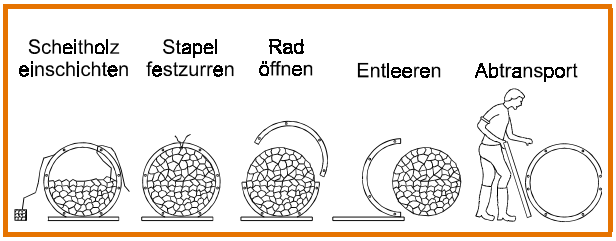


Abb. 3.16: Verwendung eines Stapelrads (nach Forestballer /3-11/)

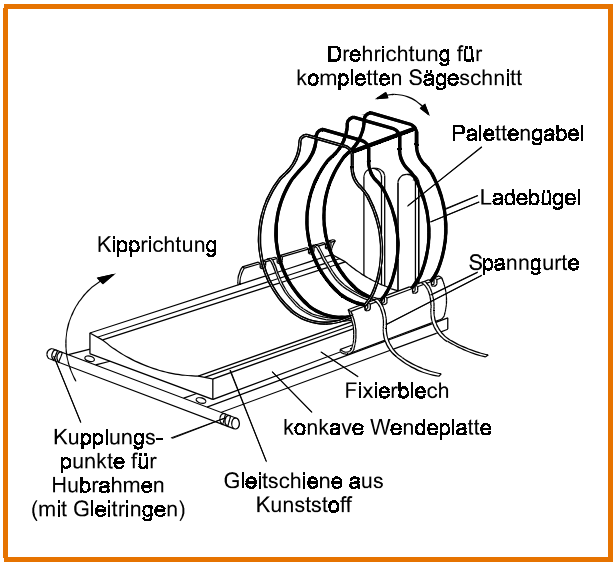


Abb. 3.17: Stückholzbindeapparat, hier mit Wendeplatte für einen Schlepperanbau-Hubrahmen (nach IBW /3-21/)

kippen, so dass Paletten mit mehreren Bündelringen, bei denen die Holzscheite dann senkrecht stehen, bestückt werden können (Abb. 3.17).

Zum Binden werden (Mehrweg-)Spanngurte oder UV-stabiles (Einweg-)Erntegarn verwendet. Um beim anschließenden Sägen auch die unten liegenden Scheite des Bundes problemlos durchtrennen zu können, sind nach dem ersten Säge-Durchgang die Bügel mit dem gesamten Stapelring auf einer Gleitschiene zu drehen, so dass der Stapel schließlich vollständig geschnitten werden kann. Die empfohlene Schwertlänge der hierfür verwendeten Motorsäge liegt bei 70 cm.

Wenn der Wenderahmen mit 2 bis 4 gesägten Ringen (je nach gewählter Scheitlänge) voll gestapelt ist, kann er gekippt werden, um die radförmigen Bündel nun liegend auf eine spezielle Palette zu befördern. Die Palette wurde zuvor über die noch senkrecht stehende Palettengabel des Wenderahmens geschoben (Abb. 3.17). Für das Kippen wird beispielsweise ein Hubrahmen verwendet, der als Anbaugerät für die Drei-Punkt-Hydraulik eines Schleppers angeboten wird. Möglich ist aber auch der Einsatz eines Krans oder eines Gabelstaplers, sofern ein spezieller Kranbügel bzw. ein Staplerbalken für die Wendeplatte vorhanden ist. Will man die geschnürten Bündel nicht auf einer Palette stapeln, können die einzelnen Rundstapel auch am Bindegurt hängend mit einem entsprechenden Fahrzeug an den gewünschten Lagerort transportiert werden. Der Gurt oder das Garn wird erst am Bestimmungsort (beim Endverbraucher) entfernt.

3.3.3 Techniken der Hackschnitzelerzeugung

Bei der Herstellung eines groben oder feinen Schüttgutes aus Holz können schnelllaufende Hacker und Schredder oder langsamlaufende Zerspaner („Trommelreißer“) eingesetzt werden. Bei den Hackern (Trommel-, Scheiben- oder Schneckenhacker) ist in der Regel eine geordnete Längszuführung paralleler Baum- oder Astteile zum Schneidaggregat erforderlich. Schredder und Zerspaner erlauben dagegen auch eine Verarbeitung von Holzresten, die in Wirrlage zugeführt werden. Die unterschiedlichen Techniken werden im Folgenden näher dargestellt.

3.3.3.1 Hacker

Da die Hackschnitzelgröße und -form die Lager-, Transport und Verwertungseigenschaften vielfach beeinflusst, werden an die Hackertechnik sehr unterschiedliche Forderungen gestellt. Dazu zählen u. a.:

- gleichmäßige Kantenlängen zur Verbesserung der Fließ- und Fördereigenschaften,
- Vermeidung von Überlängen durch vollständige Erfassung auch der feinen Zweige und Stile (zur Vermeidung von Brückenbildung im Lager),
- saubere Schnittstellen und geringe Faser- oder Rindenbeschädigung zur Verringerung der spezifischen Oberfläche des Hackguts (bessere Lagerfähigkeit),
- Vermeidung von Fremdstoffaufnahme.

Diese Ziele lassen sich durch Wahl der geeigneten Hackertechnik aber auch durch eine angepasste Maschineneinstellung, Bedienung und Instandhaltung (z. B. Messerschärfe) erreichen.

Scheibenhacker. Der Scheibenhacker arbeitet hauptsächlich nach dem Prinzip der schneidenden Zerkleinerung. Das Hackorgan besteht dabei aus mehreren Messern, die radial auf einer Schwungscheibe angeordnet sind (Abb. 3.18). Bei mobilen Systemen liegt die Anzahl Messer meist zwischen zwei und vier. Das Holz wird über eine oder mehrere gegensinnig rotierende, profilierte Einzugswalzen auf diese Scheibe zugeführt, wobei die Zuführrichtung in einem Winkel von etwa 45° zur Scheibenebene orientiert ist, um den Kraftbedarf beim Schnitt zu senken. Durch Messerschlitze in der Schwungscheibe gelangen die abgetrennten Schnitzel auf die Rückseite der Scheibe und werden dort über Wurfschaufeln („Windflügel“) in den Auswurfkanal geschleudert. Dessen Eingang kann durch Prallrippen abgedeckt sein, um ein weiteres Zerschlagen der Schnitzel durch die Wurfschau-

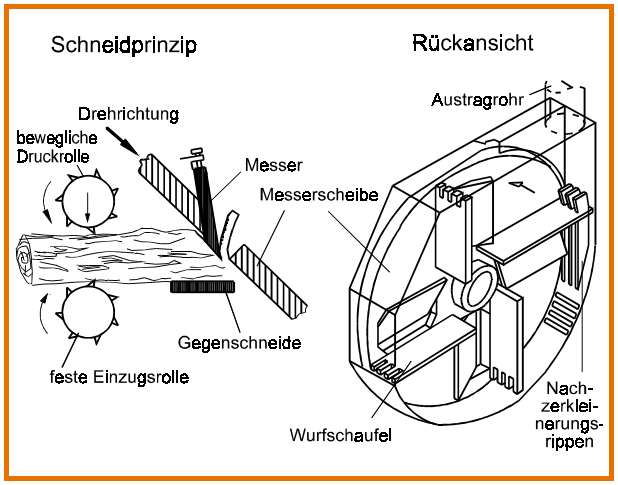


Abb. 3.18: Schneidprinzip und Austragvorrichtung eines Scheibenradhackers mit Nachzerkleinerung (nach /3-22/)

feln, die in diesem Fall an ihrer Außenseite mit Fingern versehen sind, zu bewirken (Abb. 3.18). Auch durch Verwendung eines Reibgitters im Scheibengehäuse kann eine höhere Gleichmäßigkeit der Kantenlängen erzielt werden.

Die Schnittlänge wird hauptsächlich durch die Höhe des Überstandes der Messerklingen über dem Scheibenrad bestimmt. Zur Erhöhung der Schnittlänge und zur Anpassung an eine begrenzte Antriebsleistung können einzelne Messer vollständig zurückgesetzt werden. Bei der Herstellung von Grobhackgut bis 150 mm Schnittlänge wird eine Distanzplatte zwischen Scheibe und Messerhalterung angebracht. Durch Variation der Einzugsgeschwindigkeit lässt sich hierbei die tatsächliche Schnittlänge einstellen.

Trommelhacker. Bei diesen Geräten sind 2 bis 8 durchgehende oder 3 bis 20 versetzt angeordnete Einzelmesser auf einer rotierenden, geschlossenen oder innen hohlen Trommel befestigt (Tabelle 3.4). Die Holzzufuhr erfolgt rechtwinklig zur Trommelachse, wobei der Schnitt in einer Position stattfindet, in der ein Winkel von ca. 25 bis 35° zum Gegenmesser vorliegt. Wie bei den Scheibenhackern kann die Hackgutlänge durch Vor- oder Zurücksetzen der Messer verändert werden. Meist werden Trommelhacker jedoch mit einer Nachzerkleinerungseinrichtung in Form eines auswechselbaren Prallsiebes sowie einer zusätzlichen Gegenschneide ausgerüstet. Bei solchen Bauformen wird der Hackgutaustrag durch ein Gebläse unterstützt. Trommelhacker stellen die Bauart dar, die in den höchsten Leistungsklassen angeboten wird; dies betrifft sowohl den maximalen Holzdurchmesser, der bei mobilen Geräten bis zu 450 mm betragen kann, als auch die technische Durchsatzleistung, die bei maximal 100 m^3/h liegen kann (Tabelle 3.4).

Schneckenhacker. Bei diesem Hackertyp rotiert eine konisch verlaufende, meist waagrecht liegende Schnecke in einem langgestreckten, ebenfalls konisch verlaufenden Trichter. Der Grat der Schneckenwindungen besteht aus einer aufgeschweißten Hartmetallkante, die zu einem glatten Messer angeschliffen wurde. Durch Rotation wird das Holz vom spitzen Ende des Schneckenkegels erfasst und eingezogen, wobei es unter ständigem Kraftschluss geschnitten wird. Der Austrag erfolgt wie bei den Scheibenhackern über Wurfschaufeln, die am hinteren Ende an der Schneckenwelle aufgeschweißt sind. Die Hackgutlänge lässt sich beim Schneckenhacker kaum beeinflussen, sondern entspricht der Steigung der Schneckenwindungen. Auch ist die Beschickung auf Grund des relativ engen Einzugstrichters bei sperrigem Material schwieriger als bei anderen Hackertypen.

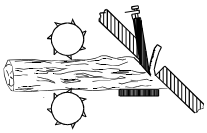
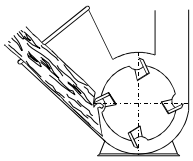
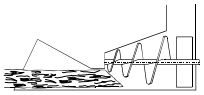
Einsatzbereiche. Hacker der diskutierten Bauarten können mobil oder stationär eingesetzt werden.

In stationären (nicht-versetzbaren) Anlagen kommen meist Trommelhacker und gelegentlich auch Scheibenhacker zum Einsatz. Sie werden im Regelfall mit einem Elektromotor entsprechender Leistung angetrieben; alternativ ist der Antrieb auch mit einem Dieselmotor möglich. Zur Beschickung werden beispielsweise Förderbänder und Mobilkräne verwendet.

Alle drei Verfahren werden auch in mobiler (versetzbarer) Ausführung für die Erzeugung von Waldhackschnitzeln angeboten. Eine Herstellerübersicht zu den verschiedenen Hackertypen und -bauarten bietet Anhang B. Bei der Einsatzplanung ist ein bestimmter Mindestplatzbedarf für das Arbeiten im Wald oder am Betriebshof zu berücksichtigen. Typische Planungswerte zeigt Abb. 3.19. Je nach Anforderung und Leistung stehen die nachfolgenden Gerätebauarten zur Verfügung.

- *An- und Aufbauhacker.* Anbauhacker sind meist kleinere und mittlere Hacker für den Zapfwellenbetrieb in der Front- oder Heckaufhängung eines Schleppers (Abb. 3.20). Sie werden von Hand oder gelegentlich auch mit Hilfe eines Anbaukrans beschickt. Aufbauhacker sind dagegen fest oder vorübergehend auf dem Chassis eines Trag- oder Universalschleppers montiert und werden in der Regel über ein Wandlergetriebe durch den Fahrzeugmotor angetrieben. Die Beschickung

Tabelle 3.4: Bauarten mobiler Hacker und ihre technischen Merkmale /3-19/

Bauart	Schneid-werkzeug	Einzugsart	max. Holz-stärke (mm)	Hacklänge (mm)	Kraftbedarf (kW)	max. Leistung (m³/h)
Scheibenhacker 	1 - 4 Messer	- ohne Zwangseinzug - 1 bis 3 Walzen	100 - 300	4 - 80 (meist ein-stellbar)	8 - 105	2 - 60
Trommelhacker 	2 - 8 durchge-hende oder 3 - 20 Einzel-messer	- 2 Walzen - Walze und Stahlglie-derband - 2 Stahlgliederbänder	180 - 450	5 - 80 (meist ein-stellbar)	45 - 325	15 - 100
Schneckenhacker 	Schnecken-windung	- selbsteinziehend	160 - 270	20 - 80 je nach Schnecke	30 - 130	5 - 40

erfolgt meist durch einen angebauten Kran mit Greiferzange.

- *Selbstfahrende Großhacker.* Selbstfahrende Großhacker sind ausschließlich für die großtechnische Hackgutproduktion geeignet. Sie sind mit einer Kranbeschickung ausgerüstet und besitzen meist einen Ladebunker zur Aufnahme des Hackguts. Dieser Bunker hat ein Fassungsvermögen von maximal 25 m^3; er ist entweder aufgesattelt oder befindet sich auf einem angehängten Fahrwerk. Das Hackgut wird durch Abkippen auf bereitgestellte Lkw-Container oder andere Transportmittel (z. B. auch ein Shuttlefahrzeug) übergeben.

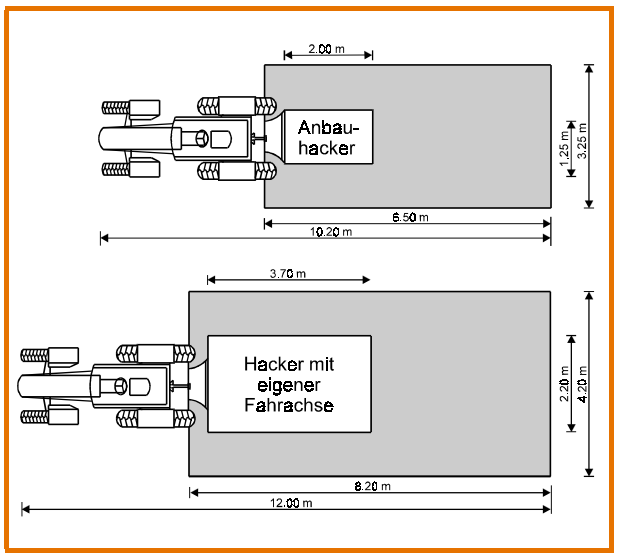


Abb. 3.19: Platzbedarf bei Arbeiten mit mobilen Hackern

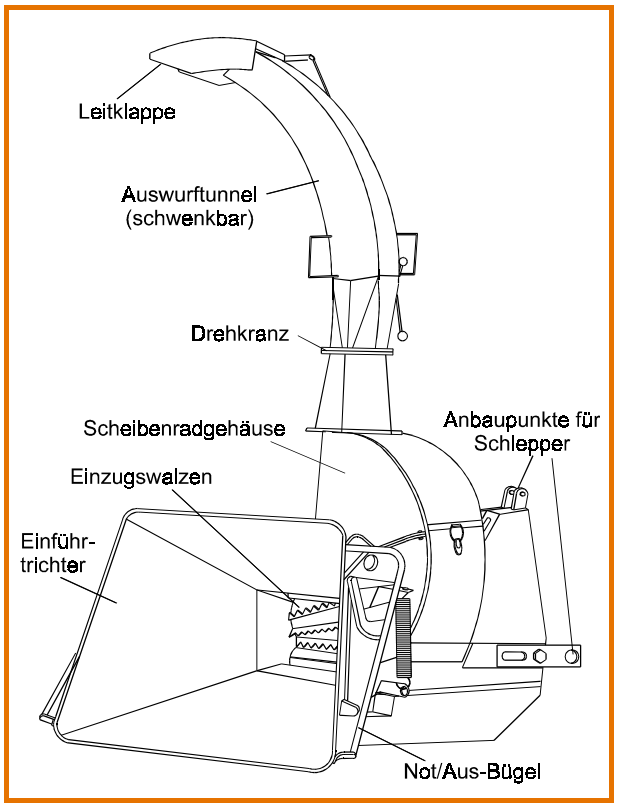


Abb. 3.20: Scheibenradhacker für den Anbau in die 3-Punkt Hydraulik eines Schleppers

- *Anhängehacker.* Während die Anbau-, Aufbau- und Selbstfahrhacker vornehmlich für den mobilen Einsatz in der Rückegasse oder auf der Holzeinschlagfläche verwendet werden, sind die versetzbaren Anhängehacker eher für den Betrieb an der Waldstraße oder an einem größeren Holzlagerplatz konzipiert. Bei diesen Geräten befindet sich das Hackaggregat auf einem separaten Anhänger. Es benötigt einen eigenen Antriebsmotor, da oft unabhängig von der Zugmaschine gearbeitet wird. Mit solchen Geräten sind beispielsweise beim überbetrieblichen Einsatz Jahresdurchsatzleistungen von 15 000 bis 20 000 Festmeter (Fm) möglich /3-8/. Für kleine Hackgutmengen können Anhängehacker auch auf einachsigen Anhängern aufgebaut und von einem Standardschlepper angetrieben werden. Diese handbeschickten Geräte besitzen teilweise auch einen kippbaren Vorratsbunker für ca. 8 bis 10 m^3 Fassungsvermögen.

Der Leistungsbedarf beim Hacken variiert je nach Holzart, eingestellter Schnittlänge und Holzfeuchte. Für waldfrisches Holz liegt der spezifische Energieverbrauch beispielsweise zwischen 2 bis 5 kWh/t /3-6/. Bei Verwendung von Dieselkraftstoff im Antriebsmotor mit etwa 30 % Wirkungsgrad entspricht dieser Energiebedarf dem Einsatz von ca. 0,7 bis 1,7 l Dieselkraftstoff pro Tonne Hackschnitzel, d. h. etwa 0,2 bis 0,5 % der im Holz enthaltenen Energiemenge (bei 30 % Wassergehalt). Bei trockenem Holz liegt der Energiebedarf für das Hacken – bezogen auf das Volumen – um ca. 18 % höher als bei waldfrischem Holz /3-6/.

3.3.3.2 Schredder und Zerspaner

Schredder. Bei Schreddern erfolgt die Zerkleinerung nicht – wie bei Hackern – durch schneidende Werkzeuge, sondern durch eine Prallzerkleinerung. Der Zerkleinerungseffekt beruht damit auf dem Brechen und Zertrümmern des Materials zwischen umlaufenden Schlagwerkzeugen und einer fest stehenden, glatten oder kammartig ausgebildeten Brechplatte.

Die Funktionsweise ist mit der einer Hammermühle vergleichbar, wenngleich der Schredder ein grobkörnigeres Hackgut erzeugt und meist nicht mit einem Prallsieb ausgestattet ist. Wenn keine schneidenden Messerklingen benutzt werden, kann ein hoher Anteil an Fremdkörpern (z. B. Steine, Metalle) im Rohmaterial toleriert werden. Dann werden meist keine fest stehenden Werkzeuge verwendet, sondern bewegliche Schlegel oder Schlaghämmer, die ausweichen können und dadurch die Stöße elastisch abfangen.

Da das Hackgut bei dieser Zerkleinerungsart stark zersplittert wird und eine raue Oberfläche besitzt, ist es im Frischzustand einem schnellen biologischen Abbau unterworfen (Kapitel 3.4.1). Deshalb werden Schredder auch bevorzugt zur Aufbereitung von Mulchmaterial oder Kompostsubstraten verwendet.

Die Beschickung erfolgt meist in Wirrlage und oft mit Hilfe eines Krans oder Förderbandes, wobei auch Anlagen mit Füllbehälter verwendet werden können („Tub Grinder"). Schredder werden – ähnlich wie Hacker – sowohl stationär als auch mobil eingesetzt.

Zerspaner. Zerspaner sind langsamlaufende Zerkleinerer. Die schneidenden oder brechenden Werkzeuge befinden sich auf einer oder mehreren gegensinnig rotierenden Ringelwalzen, die über Zahnräder, Ketten oder hydraulisch angetrieben werden. Die Arbeitswerkzeuge sind gekrümmte fingerförmige Meißel oder Reißhaken. Bei mehreren gegensinnig arbeitenden Rotoren wird zwischen den Walzen je eine Schneidfurche ausgebildet, in der das Material zersplittert (Abb. 3.21). Rotoren, die mit Brechplatten bestückt sind, benötigen eine Gegenschneide. Zur Kalibrierung der erzeugten Partikelgrößen lassen sich auswechselbare Lochsiebe verwenden.

Zerspaner werden u. a. zum Brechen sperriger Abfallhölzer (z. B. Palettenholz, Fensterrahmen, Altmöbel) und von grobem Müll aller Art verwendet. Dabei kann meist ein hoher Anteil an Störmaterialien (z. B. Metalle) toleriert werden.

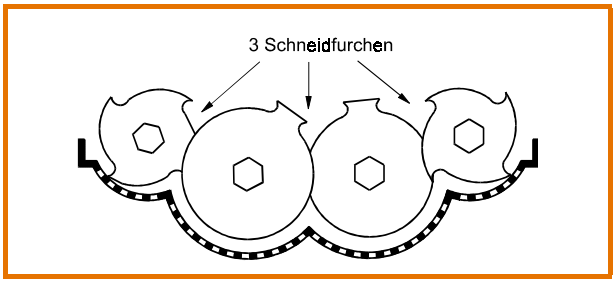


Abb. 3.21: Langsam laufender Zerspaner /3-19/

3.3.4 Brikett- und Pelletherstellung

In Allgemeinen wird unter Pellets ein körniges, verdichtetes Schüttgut verstanden (z. B. werden zylindrische Pelletformen mit 5 bis 8 mm Durchmesser für die Verwendung in Kleinfeuerungsanlagen und solche mit 10 bis 12 mm Durchmesser für mittlere Anlagenleistungen eingesetzt). Als Holzbriketts werden dagegen meist größere überwiegend stapelbare längliche Formen von Stückgütern bezeichnet; allerdings

kommen auch kürzere und runde Formen, ähnlich wie bei der „Eierkohle“, als Schüttgutbriketts vor. Pellets haben unebene „Abbruchkanten“ während Briketts in der Regel regelmäßige Formen mit glatten geschnittenen Kanten aufweisen.

Durch eine Brikettierung und Pelletierung ist ein Höchstmaß an Homogenität bezüglich der physikalisch-mechanischen Merkmale der Brennstoffe erreichbar. Die Vorteile dieser Aufbereitungsformen sind u. a.

- hohe volumetrische Energiedichte und die damit verbundenen logistischen Vorteile,
- günstige Fließ- und Dosiereigenschaften,
- Feuchtereduktion durch den Verdichtungsvorgang,
- Möglichkeit zur Verwendung von Zuschlagstoffen zur Veränderung der chemisch-stofflichen Brennstoffeigenschaften,
- hohe Lagerstabilität (kein biologischer Abbau).

Diesen Vorteilen steht vor allem der Nachteil erheblich höherer Produktionskosten gegenüber /3-14/.

Brikettier- und Pelletieranlagen für Holzbrennstoffe werden unter anderem zur Aufbereitung von Holzresten aus Sägewerken oder bei Sekundärverarbeitern von Holz eingesetzt (u. a. für Sägemehl, Späne, Holzstaub). Pelletieranlagen sind auch in der Futtermittelindustrie (z. B. in Grünfuttertrocknungsanlagen) im Einsatz. Die Bindemechanismen der Pelletier- und Brikettierung beruhen auf der Herstellung einer formschlüssigen Bindung durch Vernetzung von Fasern und auf der Bildung von Festkörperbrücken durch die verklebende Wirkung von Inhaltsstoffen (Eiweiß, Pektin, Wachs, Stärke). Die Ausbildung solcher Festkörperbrücken kann durch entsprechende Zuschlagstoffe verstärkt werden. Für Biobrennstoffe sind hierfür in Deutschland Bindemittel aus Stärke, pflanzlichem Paraffin oder Melasse zugelassen (vgl. Kapitel 8.4). Nachfolgend werden die Herstellungsverfahren beschrieben.

3.3.4.1 Brikettierung

Die Brikettierung von Biomasse kann nach dem Strangpress- oder dem Presskammerverfahren erfolgen. Bei den Strangpressen werden überwiegend die sogenannten Kolbenstrangpressen eingesetzt. Dabei wird das zu verpressende Material zum Teil vorverdichtet und in den zylindrischen Presskanal eingeführt, in dem sich ein Kolben hin und her bewegt. Dieser Kolben wird entweder mechanisch über einen mit Schwungmassen versehenen Kurbeltrieb (Abb. 3.22) oder hydraulisch angetrieben. Das zugeführte Material wird gegen das bereits verdichtete gedrückt,

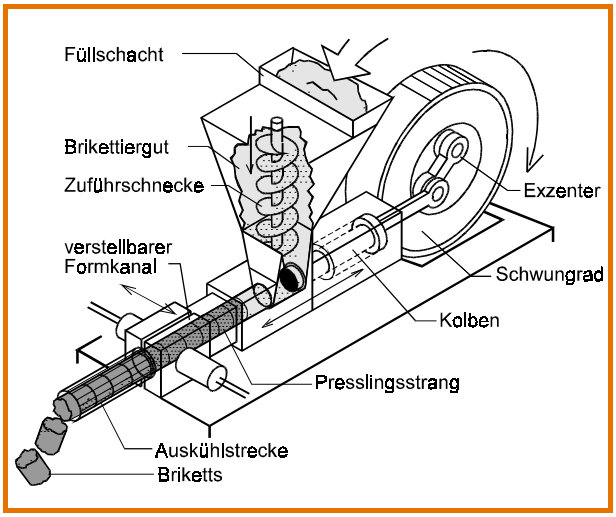


Abb. 3.22: Arbeitsweise einer Kolbenstrangpresse mit schwungmasseunterstütztem Antrieb /3-19/

so dass ein Materialstrang entsteht, der im Rhythmus der Kolbenstöße aus dem Pressraum austritt. Der benötigte Gegendruck wird durch Reibung im Presskanal aufgebaut. Er lässt sich durch eine einstellbare Verjüngung im hinteren Presskanalabschnitt regeln. Durch Reibung und Druck (bis ca. 1 200 bar) kommt es zu einer starken Aufheizung des Presslingsstranges, deshalb ist eine gezielte Kühlung erforderlich. Bei größeren Brikettieranlagen wird daher ein Kühlwasserkreislauf durch spezielle Kühlkanäle im Austrittskopf des Formkanals geleitet. Zusätzlich wird der austretende Brikettstrang über eine nachgeschaltete Auskühlschiene geleitet, die eine Gesamtlänge von bis zu 40 m besitzen kann. Am Ende dieser Schiene wird der Strang meist auf eine vorgegebene Länge zugeschnitten bzw. gebrochen. Je nach Abmessung wird dadurch entweder ein Schüttgut oder ein Stapelgut erzeugt.

Um eine möglichst hohe Dichte und Abriebfestigkeit zu erreichen ist eine ausreichende Vorzerkleinerung und Trocknung (unter 13 % Wassergehalt) des Ausgangsmaterials notwendig. Unter diesen Bedingungen werden Einzeldichten der Presslinge zwischen 1,1 und 1,25 g/cm^3 erzielt. Es werden Anlagen im Leistungsspektrum von 25 bis 1 800 kg/h angeboten. Bei Briketts betragen die Presslingsdurchmesser zwischen 40 und 100 mm, wobei der Bereich zwischen 50 und 70 mm besonders häufig ist. Beim spezifischen Energiebedarf ist mit 50 und 70 kWh/t zu rechnen (ohne Zerkleinern und Trocknen) /3-50/. Neben dem runden Querschnitt lassen sich auch eckige Formen mit oder ohne abgerundete Kanten herstellen. Hierfür ist allein die Querschnittsform des Formkanals verantwortlich.

Im Unterschied zu den Strangpressen erfolgt die Verdichtung beim Presskammerverfahren diskontinuierlich. Das zu verpressende Material wird zunächst vorverdichtet und dann der eigentlichen Presskammer zugeführt. Diese besteht aus einer festen Form mit unveränderlichen Abmessungen, in die das Material meist hydraulisch eingepresst wird. Bei diesem Verfahren sind geringere Reibungskräfte zu überwinden als bei den Strangpressen. Daher ist der spezifische Energiebedarf mit ca. 20 kWh/t relativ niedrig /3-50/. Allerdings ist auch die Durchsatzleistung gering. Die Anforderungen an die Brikettqualität regelt die DIN-Norm 51 731 /3-7/ (vgl. Kapitel 4).

3.3.4.2 Pelletierung

Zur Pelletierung von Biomasse kommen hauptsächlich Kollergangpressen zum Einsatz. Bei diesem Verfahren sind 2 bis 5 Rollen („Koller“) an einer bzw. mehreren gekreuzten Achsen angebracht, die in ihrer Mitte eine vertikale (bei Flachmatrizenpressen) oder horizontale (bei Ringmatrizenpressen) Drehachse besitzen.

Bei der Ringmatrizenpresse (Abb. 3.23) verharren die Kollerachsen in starrer Position, während die Matrize angetrieben wird. Die einzelnen Koller rotieren dabei um die eigene Achse; sie werden meist passiv durch Reibung mit der Matrize bzw. deren Pressgutauflage angetrieben. Das Material wird dabei in die Bohrungen der Matrize hineingepresst und dort verdichtet. Die am Ende der Bohrungen austretenden Presslinge können auf der anderen Seite der Matrize durch Abschermesser auf die jeweils gewünschte Länge abgeschert werden.

Wie bei der Brikettierung kommt auch für die Pelletierung nur feines und trockenes Material in Frage. Der Feuchteverlust durch die im Prozess stattfindende Aufheizung (Reibungsenergie) beträgt nur ca. 1 bis 2 Wassergehalts-Prozentpunkte. Der spezifische Energieaufwand für die Pelletierung variiert je nach Vorbehandlung (z. B. Zerkleinerung, Trocknung, Vorwärmung). Ohne die Energieaufwendungen für das Zerkleinern, Fördern, Beschicken und Kühlen – die in der Summe meist höher liegen als die des eigentlichen Pelletiervorgangs – ist mit ca. 40 kWh pro Tonne zu rechnen, das entspricht ca. einem Prozent der im Brennstoff enthaltenen Energie. Allerdings handelt es sich hierbei um mechanische Energie, die ihrerseits unter weiteren Verlusten hergestellt werden muss. In Primärenergieeinheiten ist somit mit ca. 120 kWh zu rechnen. In der Summe aller Aufwendungen schlägt der gesamte Pelletierprozess mit ca. 4 bis 6 % der Brennstoffenergie zu Buche.

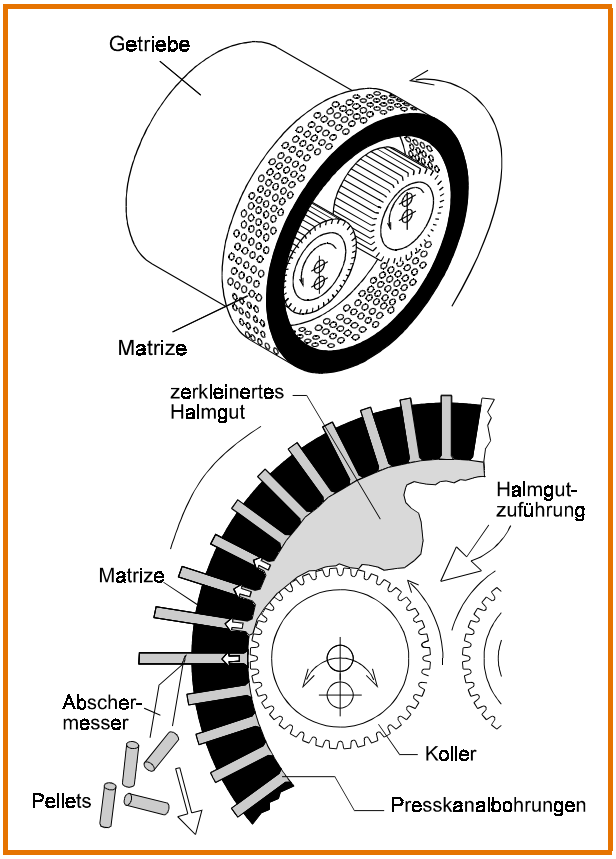


Abb. 3.23: Arbeitsweise einer Kollergangpresse mit Ringmatrize /3-19/

Die Anforderungen an die Pelletqualität regelt die DIN-Norm 51731 /3-7/ bzw. die ÖNORM 7135 /3-40/ (vgl. hierzu Kapitel 4).

3.4 Lagerung

Die Lagerung dient der Überbrückung der Zeitspanne zwischen dem Anfall der Biomasse und ihrer energetischen Nutzung. Im Fall von Scheitholz erfüllt sie aber auch den Zweck einer allmählichen Brennstofftrocknung (Kapitel 3.5). Die hierbei auftretenden Risiken und die verwendeten Techniken werden nachfolgend angesprochen.

3.4.1 Lagerungsrisiken

Die Lagerung biogener Materialien ist – vor allem für Schüttgutbrennstoffe – mit einer Reihe von Risiken verbunden. Im Wesentlichen sind dies /3-20/:

- Substanzverlust durch biologische Prozesse (Verlustrisiko),
- Selbstentzündung (Gefährdungsrisiko),
- Pilzwachstum und Pilzsporenbildung (Gesundheitsrisiko),

- Geruchsbelästigung (Umweltrisiko),
- Wiederbefeuchtung bzw. Umverteilung des Wassergehaltes (Qualitätsrisiko).

Viele dieser Risiken (Substanzabbau, gesundheitliche Gefahren) treten in nennenswertem Maße lediglich bei feuchten Holzhackschnitzeln oder Rinde auf. Sie sind vor allem auf biologische Vorgänge zurückzuführen und werden nachfolgend erläutert.

Selbsterhitzung und Selbstentzündung. Frisch eingelagerte feuchte lignocellulosehaltige Biomasse erhitzt sich zunächst hauptsächlich durch die Respiration der noch lebenden Parenchymzellen. Ab einer Temperatur von 40 °C kommt diese Respiration dann weitgehend zum Erliegen. Die tatsächlich beobachtete weitere Wärmeentwicklung dürfte deshalb auf den Metabolismus von Pilzen und Bakterien zurückzuführen sein /3-23/. Pilze können Temperaturen bis etwa 60 °C überleben, während thermophile Bakterien ihre Aktivität erst bei mehr als 75 bis 80 °C einstellen. Trotzdem kann sich lignocellulosehaltige organische Substanz während der Lagerung unter bestimmten Bedingungen auf noch höhere Temperaturen erwärmen. Die Ursachen für diesen weiteren Temperaturanstieg bis 100 °C und ggf. darüber sind jedoch noch nicht vollständig geklärt.

Oberhalb von 100 °C setzt schließlich die thermochemische Umwandlung bzw. eine chemische Oxidation ein, die bis zur Selbstentzündung führen kann. Diese Gefahr besteht vor allem bei der Einlagerung von feuchten Heuballen sowie – wenngleich seltener – bei fein zerkleinerten feuchten Holzbrennstoffen (z. B. Sägemehl, Rinde). Bei solchen Sortimenten kann die entstehende Wärme auf Grund der behinderten natürlichen Konvektion und der geringen Wärmeleitung oft nicht ausreichend abgeführt werden.

Eine Hygienisierung des Brennstoffs durch Temperaturen um 80 °C findet nicht statt. Die Mikroorganismen verharren statt dessen in einem Ruhezustand; deshalb ist nach der Abkühlung eine rasche Wiedererwärmung möglich /3-6/.

Die Geschwindigkeit, mit der der Temperaturanstieg verläuft, hängt von verschiedenen Kriterien ab. Hierzu zählen

- Wassergehalt,
- Materialstruktur (spezifische Oberfläche und Partikelgrößenverteilung),
- Materialdichte,
- eingelagerte Menge (Lager- bzw. Schütthöhe),
- Ort und Art der Lagerung (z. B. mit/ohne Abdeckung, außen/innen, Luftzutritt),
- Brennstoff- bzw. Biomasseart,

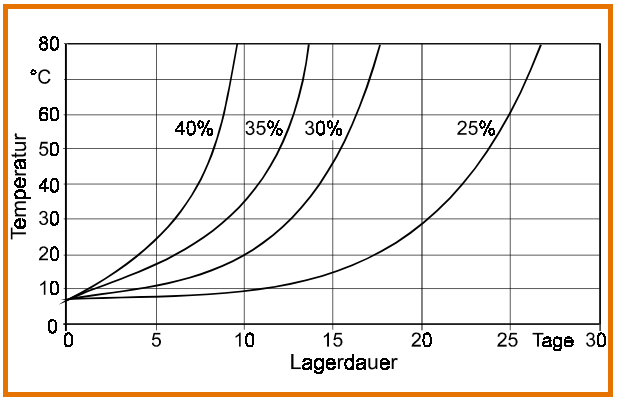


Abb. 3.24: Typischer Verlauf des Temperaturanstiegs bei der Hackgutlagerung in Abhängigkeit vom Wassergehalt /3-6/

- Verunreinigungen,
- Einlagerungs- und Umgebungstemperatur und
- Anfangsbefall mit Bakterien oder Pilzen.

Bei optimalen Wachstumsbedingungen für Pilze und Bakterien (z. B. bei Wassergehalten um 40 %) erfolgt die Erwärmung bereits nach wenigen Tagen (Abb. 3.24). Dagegen findet bei entsprechend niedrigen Temperaturen (z. B. unter Dauerfrostbedingungen) kein Abbau des organischen Materials statt, wenn der Brennstoff nicht bereits zuvor schon erwärmt war.

Substanzverluste. Infolge von Pilzwachstum und bakterieller Aktivität kommt es zu einem Abbau von Trockenmasse, d. h. zu Verlusten an brennbarer organischer Substanz. Zur Minimierung solcher Verluste muss die biologische Aktivität möglichst unterbunden werden. Dazu bieten sich die folgenden Maßnahmen an, die insbesondere bei gefährdeten Brennstoffen wie Hackschnitzel oder Rinde sinnvoll sind:

- Herbeiführen eines geringstmöglichen Wassergehalts bei der Einlagerung,
- Vermeidung von Nadeln und Blättern als leicht mikrobiell angreifbares Material,
- Minimierung der Lagerdauer,
- Niederschlagsschutz,
- guter Luftzutritt (Wärme- und Feuchteabfuhr),
- optimale Schütthöhe,
- möglichst grobe Materialstruktur bei Langzeitlagerung (Verbesserung des Luftzutritts),
- Vermeidung von stumpfen Schneidwerkzeugen oder Schreddern (bei feucht eingelagerten Hackschnitzeln),
- aktive Trocknung oder Belüftungskühlung.

Oft sind die genannten Maßnahmen nicht immer in vollem Umfang möglich. Daher sind Substanzverluste in den meisten Fällen einzukalkulieren. Im Allgemei-

Tabelle 3.5: Jährliche Trockenmasseverluste bei der Holzlagerung in Haufen im Freien, (z. T. mehrmonatige Lagerung auf 1 Jahr hochgerechnet, nach /3-20/)

Material / Lagerart	Verlust (% TM/a)
feines Waldhackgut, frisch, unabgedeckt	20 bis >35
feines Waldhackgut, getrocknet, abgedeckt	2 bis 4
grobstückiges Waldhackgut (7 bis 15 cm), frisch, abgedeckt	ca. 4
Rinde, frisch, unabgedeckt	15 bis 22
Holzstangen (Fichte, Kiefer), frisch, unabgedeckt	1 bis 3
junge Ganzbäume (Pappel, Weiden) frisch, unabgedeckt	6 bis 15

nen gelten hierfür die Orientierungswerte in Tabelle 3.5. Trockenmasseverluste können aber auch – zumindest teilweise – kompensiert werden, wenn der Wassergehalt im Lagerzeitraum absinkt, wodurch sich der aktuelle Heizwert (bezogen auf 1 kg Masse inkl. Wasser) erhöht.

Auch bei der Trocknung durch eine aktive Belüftung bleibt das frisch eingelagerte Material noch eine Weile lang biologisch aktiv, so dass mit Gesamtverlusten bis ca. 4 % gerechnet werden muss (Trockenmasse). Bei intermittierender Belüftungskühlung, die ein gewisses Maß an Selbsterwärmung zulässt (Kapitel 3.5.2.2), verdoppeln sich diese Verluste auf ca. 7 bis 8 % /3-37/.

Pilzwachstum und Gesundheitsrisiken. Das Pilzwachstum ist nicht nur wegen der damit verbundenen Trockenmasseverluste sondern auch wegen der Gesundheitsgefährdung durch freigesetzte Pilzsporen von Bedeutung.

Bei Holz wird unterschieden zwischen Pilzen, die die Moderfäule verursachen (Ascomyceten, Deuteromyceten) sowie Weiß- und Braunfäulepilzen (Basidiomyceten). Bei längerfristiger Lagerung sind letztere hauptverantwortlich für den mikrobiellen Holzabbau. Während Moder- und Braunfäulepilze hauptsächlich Cellulose und Hemicellulose zerstören, können Weißfäulepilze auch Lignin abbauen. Da Lignin normalerweise nur schwer abbaubar ist, erhöht sich häufig sein Anteil bei der Lagerung (ca. 1 bis 3 Prozentpunkte bei mehrmonatiger Lagerung /3-32/). Es kann aber auch ein selektiver Ligninabbau durch Weißfäulepilze stattfinden. Je nachdem welcher Prozess überwiegt, erhöht oder vermindert sich der Heizwert. Das liegt daran, dass Lignin einen deutlich höheren Heizwert als z. B. Cellulose aufweist (Kapitel 4), so dass sich Veränderungen bei diesem Holzbestandteil besonders stark auswirken.

Schimmelpilze (d. h. Aspergillus, Penicillium) tragen nur unwesentlich zum Substanzabbau bei, da sie zunächst nur die auf der Oberfläche der Biomasse befindlichen Nährstoffe nutzen.

Das gesamte Pilzwachstum wird von einer Vielzahl unterschiedlicher Größen beeinflusst /3-20/. Zu den Wichtigsten zählen die Temperatur und der Wassergehalt. Die für das Pilzwachstum geltenden Optima sind in Abb. 3.25 dargestellt.

Risiken für die menschliche Gesundheit gehen vor allem von den Pilzsporen aus, die sich bei der Lagerung bilden können und die bei der Manipulation des Brennstoffs (d. h. bei Um- bzw. Auslagerungsvorgängen) in die Atemluft gelangen können. Sie sind Auslöser für verschiedene Arten von Gesundheitsschäden wie den Mykoallergosen und den Mykotoxicosen. Bei den Mycoallergosen spricht man auch von „Holzschnitzel-Alveolitis“ oder allgemein von „exogen allergischer Alveolitis“ (EAA), eine allergische Spätreaktion, die von wiederholt eingeatmeten organischen Stäuben hervorgerufen wird /3-9/. Sie war früher auch als „Farmerlunge“ bekannt. Mykotoxicosen sind dagegen Vergiftungen, die von den Stoffwechsel- und Zellbestandteilen der Pilze selbst ausgelöst werden.

Zur Vermeidung von Erkrankungen können eine Vielzahl von Maßnahmen genannt werden /3-9/:

- Holz soll möglichst in ungehackter Form vorlagern bzw. vortrocknen.
- Die Lagerdauer der Schnitzel ist kurz zu halten (Anhaltswert: drei Monate).
- Es sollten möglichst wenig Grünanteile (Nadeln oder Laub) eingelagert werden.

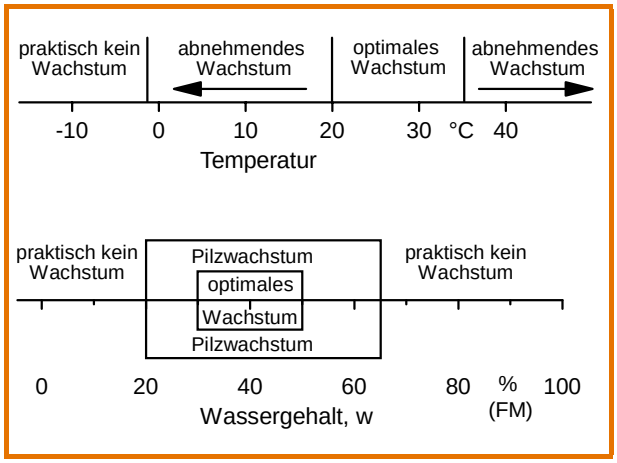


Abb. 3.25: Temperatur- und Wassergehaltsansprüche holzabbauender Pilze (nach /3-12/)

- Grobhackgut (ab 50 mm) trocknet besser, wodurch die Pilzentwicklung langsamer ist. Der Anteil der Feinfraktion soll niedrig sein.
- Das Hackschnitzellager ist möglichst entfernt von Arbeits- und Wohnplätzen anzulegen und die Haupt-Windrichtung ist zu beachten.
- Die räumliche Ordnung sollte die Verwendung in der Reihenfolge der Einlagerung ermöglichen.
- Heizräume und Lager müssen möglichst sauber gehalten werden.
- Bei Außenlagerung sollen die Haufen in Form von Spitzkegeln ausgebildet werden, damit die Durchfeuchtung bei Regen möglichst gering bleibt.
- Bei Innenlagerung ist bei gleicher Schütthöhe die Dammform vorzuziehen.
- Die Lagerräume sollen hoch und zugig sein, damit Kondensation über den Haufen verhindert wird.
- Bei Innenlagerung (Bunker) soll ein Abluftsystem vorhanden sein.
- Die Abluft aus der Lüftung kann direkt in den Brennraum geleitet werden, wo die Sporen verbrannt werden.
- Kaltlufttrocknung, Kaltbelüftung und Lagerung in überdachten Draht- oder Holzgitterkästen hat sich als günstig erwiesen und ist somit zu empfehlen.
- Nie Kleider, Nahrungs- oder Genussmittel in Räumen aufbewahren, in denen Hackschnitzel gelagert werden.

In größeren Anlagen ist die hohe Mechanisierung und Automatisierung von Umschlagprozessen hilfreich. Hier werden auch Fahrzeugkabinen mit Mikrofiltern ausgerüstet, und es werden spezielle Schutzhelme mit mikrofiltrierter Atemluft verwendet.

3.4.2 Lagerungstechniken

3.4.2.1 Scheitholz

Lagergestaltung. Die Lagerung findet sowohl im Freien als auch unter Dach statt. Eine Lagerung auf Freiflächen ist in der Praxis vor allem bei unaufbereitetem oder teilaufbereitetem Holz weit verbreitet. Dabei sollte sichergestellt werden, dass eine Sekundärverschmutzung minimiert wird. Gleiches gilt auch für den Schutz vor Bodenfeuchtigkeit. Als Untergrund eignen sich Holzplanken, Paletten oder trockener Kiesboden. Für den Umschlag mit Hilfe von Ladefahrzeugen (z. B. Frontlader, Radlader) ist meist zusätzlich eine belastbare Bodenplatte (Beton, Asphalt, Verbundsteinpflaster) erforderlich. Alternativ können hierfür auch Holzkonstruktionen in Frage kommen; zum Beispiel in halboffenen Gebäuden mit Lagerböden aus hohl liegenden Rundhölzern.

Ofenfertig aufbereitetes Brennholz sollte im Freien nicht ohne Regenschutz lagern, damit es für die Verbrennung ausreichend trocken ist. Stückiges Brennholz erreicht den geforderten lufttrockenen Zustand (w = 12 bis 20 %) normalerweise erst nach einer ein- bis zweijährigen Lagerdauer. Eine Wiederbefeuchtung ist in jedem Fall durch eine mobile Abdeckung (z. B. Plane) oder durch eine feste Überdachung (z. B. verlängerte Dachtraufe) zu verhindern. Dabei ist darauf zu achten, dass ein natürlicher Luftzutritt zum Holzstoß von allen Seiten her möglich ist, damit die im Lager entstehende feuchte Luft abgeführt werden kann. Für eine qualitätsgünstige Lagerung sind folgende Bedingungen zu beachten:

- Holzstapel regengeschützt abdecken,
- trockenen Untergrund schaffen, möglichst mit Luftzutritt (Rundholz, Paletten etc.),
- als Lagerort möglichst windexponierte Fläche wählen (z. B. Lagerung am Waldrand anstatt im Wald),
- Abstand zu Gebäudewänden oder zwischen den Holzstapeln mindestens ca. 10 cm (Abb. 3.26),
- an Gebäudewänden sonnenzugewandte Seite bevorzugen,
- falls möglich Tagesverbrauch an Brennstoff in beheizten Räumen (z. B. im Aufstellraum der Feuerung) bevorraten (Brennstoffvorwärmung!)
- bei Lagerung in Gebäuden ohne besondere Feuerschutzeinrichtungen ist die maximal zulässige Brennstoffmenge zu beachten, d. h. maximal 15 t

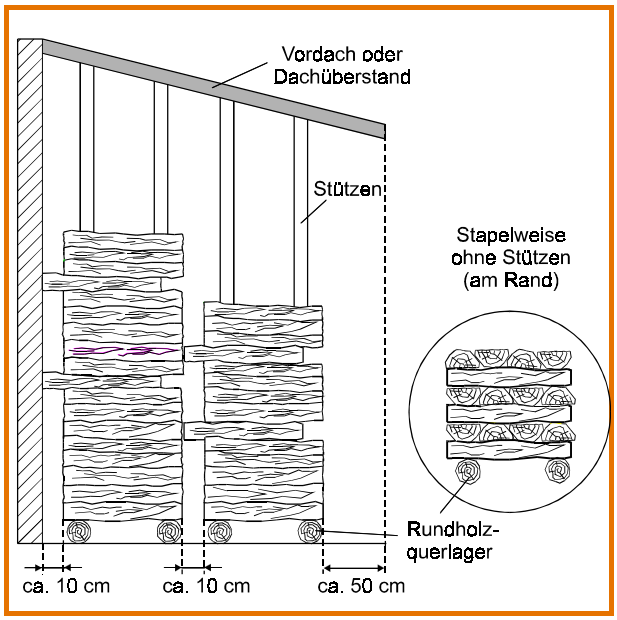


Abb. 3.26: Stapelung von Scheitholz an Gebäudewand (ab ca. 0,5 m Scheitlänge)

Holzbrennstoff (entspricht 31 Raummeter (Rm) Buchenscheitholz bzw. 43 Rm Fichtenscheitholz, jeweils lufttrocken).

Als Regenschutz-Abdeckung kommen verschiedene Materialien in Frage. Hierzu zählen z. B. Dachpappen, Kunststoffplanen oder Eindeckmaterialien aus Profilblech. Zur Vermeidung von Windangriff muss die Abdeckung befestigt bzw. beschwert werden. Bei dünnen Kunststoffplanen wird die Abdeckung sinnvollerweise haubenartig ausgeführt, indem die Plane an den Kanten des Stapels nach unten um ca. 20 bis 30 cm abknickt, damit sie mit einer Holzlatte festgenagelt werden kann. Die Seiten des Stapel müssen dabei aber weitgehend offen bleiben, um die Durchlüftung nicht zu behindern.

Lager- und Transportbehälter. Wenn das Scheitholz nicht beim Endverbraucher sondern im Handel bzw. beim Erzeuger (zwischen-)gelagert wird, kann die Verwendung von Transportbehältern sinnvoll sein. Eine Auswahl von gängigen Systemen für den gewerblichen Handel bietet Abb. 3.27. Die Behälter sind im Bauzubehörhandel erhältlich. Als Transportgebinde werden außerdem gelegentlich Einwegsäcke für ungestapeltes Scheitholz verwendet. In der Regel sind diese Techniken jedoch für den kleingewerblichen Brennholzhandel mit zu hohen Investitionskosten verbunden, so dass in der Praxis oft günstigere Lösungen wie beispielsweise Scheitholzbündel (Kapitel 3.3.2.4) verwendet werden.

Noch günstiger sind Eigenbaulösungen. Bewährt haben sich hierbei Standardpaletten, die mit Baustahl-Bewehrungsmatten zu versetzbaren Gitterboxen umgebaut wurden. Da es sich hierbei oft um Behälterhöhen von mehr als 2 Metern handelt, werden die Scheite nicht mehr gestapelt sondern in Wirrlage eingefüllt. Aus solchen Bewehrungsmatten werden oft auch runde nicht versetzbare Kleinsilos aufgestellt. Bei allen diesen Lösungen ist auf eine trockene (mindestens abgedeckte) Aufstellung mit gutem Luftzutritt zu achten.

3.4.2.2 Hackschnitzel

Auch bei der Hackschnitzellagerung ist ein Schutz vor Niederschlag zu gewährleisten. Zur Erleichterung der Mechanisierung der Ein- und Auslagerung empfiehlt sich eine Lagerung in Gebäuden oder Silos.

Gebäude. Neben der Nutzung vorhandener z. B. landwirtschaftlicher Gebäude kommt für die Hackschnitzellagerung auch die spezielle Errichtung einfacher Rundholzbergehallen in Frage (Abb. 3.28). Für den Bau solcher Hallen werden für den Gebäuderahmen entrindete, ansonsten aber unbearbeitete Rundhölzer verwendet. Unter Umständen kann auf eine massive Bodenplatte verzichtet werden; statt dessen

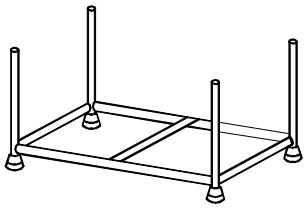
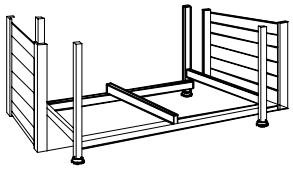
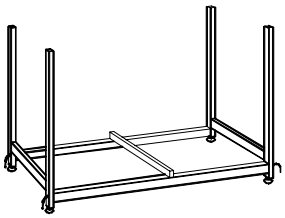
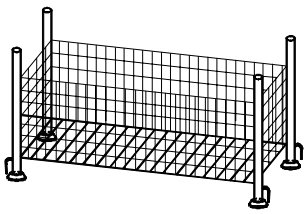
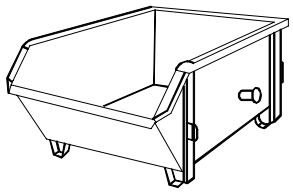
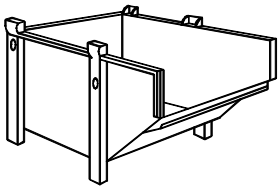
Langgut-Stapelgestell 	lackiert, mit 4 Kranhaken, Tragfähigkeit: 1 t Abmessungen: 1300 x 700 x 700 mm, 1500 x 870 x 600 mm, 1200 x 800 x 700 mm (mit abnehmbaren Holmen)
Langgut-Sicherheitsgestell 	lackiert, mit abnehmbaren Holmen, Absicherung des Lagergutes gegen Verrutschen durch Seitenbleche, Abmessungen: 1455 x 915 x 620 mm, Auszugslänge der Schutzbleche: 1,60 bis 3,02 m
Holzschalungsträger-Palette 	lackiert, Tragfähigkeit 1,5 t Abmessungen: 1600 x 1050 x 900 mm
Gitterbox-Palette 	lackiert, Maschenweite: 50 x 50 x 4 mm mit gesticktem Stahlblechboden 1,5 mm stark, Abmessungen: 1300 x 700 x 700 mm oder 1500 x 870 x 600 mm
Materialbox 	feuerverzinkt, mit Wasserablauflöchern, für Kran- und Staplerbetrieb geeignet Abmessungen: 1000 x 800 x 500 mm
Schuttcontainer 	lackiert, stapelfähig, wasserdichte Verschweißung, Inhalt: 1 m³

Abb. 3.27: Handelsübliche Paletten und Container

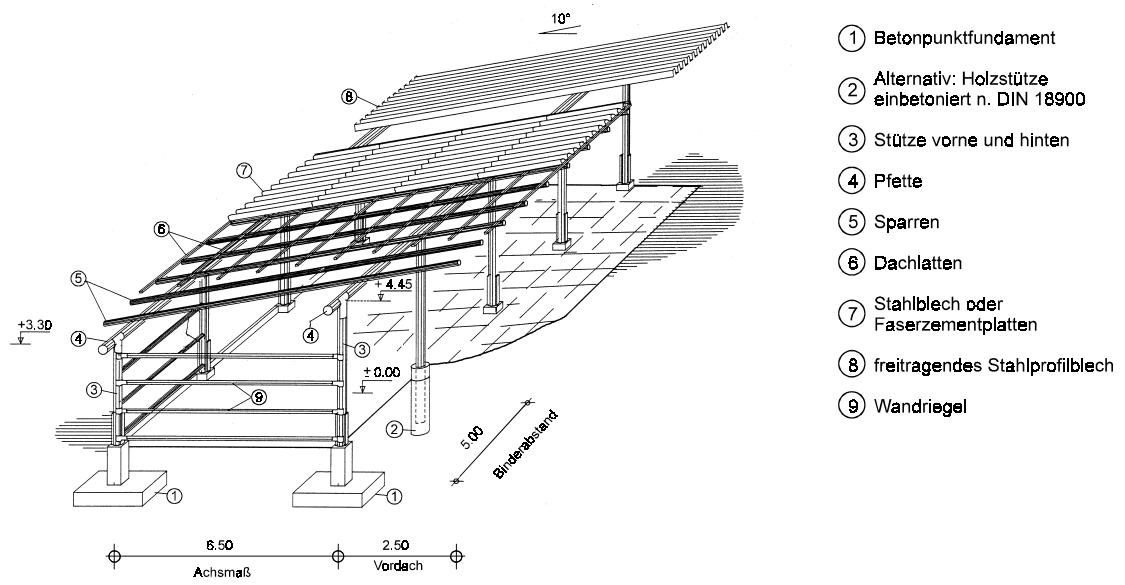


Abb. 3.28: Rundholz-Pultdachhalle mit Rundholzverbindern /3-47/

sind lediglich Punktfundamente erforderlich. Auf Grund der Tatsache, dass bereits in der Praxis hierfür bewährte Baupläne mit Materiallisten inklusive Statik verfügbar sind (Quelle: /3-26/) und bei der Errichtung ein hoher Eigenleistungsanteil möglich ist, können solche Gebäude kostengünstig errichtet werden. Sie sind außerdem – je nach relevanter Landesbauordnung – innerhalb bestimmter Abmessungen für die Landwirtschaft genehmigungsfrei. In Bayern liegt diese Grenze beispielsweise bei 140 m² Dachfläche oder 100 m² umbauter Grundfläche.

Für Schüttgüter ist auch in solchen einfachen Gebäuden stets eine Umhausung und ggf. eine Aufteilung des Gebäudegrundrisses erforderlich, wobei die Seitendruckstabilität gesichert sein muss. Die Gebäudewände oder Abtrennungen dienen dabei meist auch als Begrenzungswände für Satztrockner mit Zwangsbelüftung (Kapitel 3.5.3). Lediglich bei grobem Hackgut kann auf eine Zwangsbelüftung von feucht eingelagertem Material verzichtet werden; hier ist es – wie beim Scheitholz – meist sinnvoll, die Wandungen des Lagergebäudes luftdurchlässig zu gestalten, z. B. durch Schlitzwände aus Holzbrettern (Spaceboard). Grundsätzlich gilt für alle Lagergebäude für feuchte Brennstoffe, dass ein größtmöglicher Luftzutritt sichergestellt sein sollte, um einer Kondenswasserbildung und den daraus resultierenden Gebäudeschäden vorzubeugen.

Hochbehälter. Schüttgüter können auch in Hochbehältern (Rund- oder Viereck-Silos) gelagert werden. Derartige Behälter werden in vorhandenen Gebäuden oder mit einer entsprechenden Bedachung im Freien aufgestellt. Sie bestehen aus Holz, Kunststoff oder Metall; bei letzterem handelt es sich überwiegend um Wellblechkonstruktionen, die ab einer Höhe von rund 5 m mit Seitenstützen verstärkt werden. Der Einbau von Belüftungssystemen zur Kühlung und/oder Trocknung ist hierbei leicht möglich. Die Befüllung derartiger Hochbehälter kann pneumatisch oder mit mechanischen Fördersystemen erfolgen. Bei der Entnahme kann allerdings nicht auf ein spezielles Austragssystem (z. B. mit Blattfederrührwerk) verzichtet werden (vgl. Kapitel 3.4.3).

Lagerung an der Feuerungsanlage. Für die an der Feuerung lagernden Brennstoffe gelten prinzipiell die gleichen Lageranforderungen wie bei Gebäuden oder Silos. Das gilt insbesondere, wenn es sich dabei nicht um Kurzzeitlager, sondern – wie häufig bei Kleinanlagen – um das saisonale Lager selbst handelt.

Abb. 3.29 zeigt verschiedene Lagervarianten in ihrer funktionalen Verknüpfung mit der Konversionsanlage. Demnach kann der Brennstoff an der Konversionsanlage z. B. in einem oberirdischen Rundsilo (oberhalb oder neben einem Kessel), in einer oberirdischen Lagerhalle (neben einem Kessel), oder in einem unterirdischen Lagerraum gelagert werden. Bei größeren Anlagen ist außerdem auch der Einsatz von Wechselcontainern (ca. 32 m^3 Inhalt) mit integriertem Schubboden möglich.

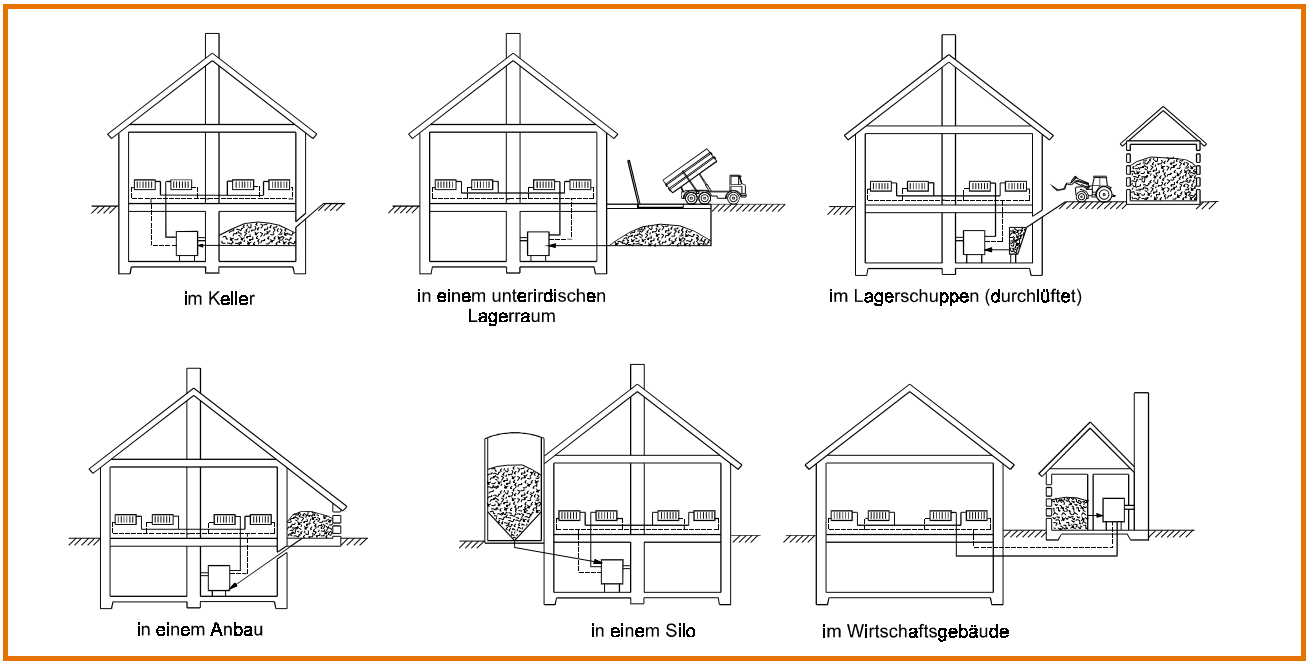


Abb. 3.29: Varianten der Brennstoffbevorratung an einer Hackschnitzelfeuerung (nach /3-1/)

Für den Vorgang der Brennstoffeinlagerung bestehen unterschiedliche technische Lösungen. Bei unterirdischen Lagern ist eine direkte Befüllung vom Transportfahrzeug aus möglich; hier können daher stationäre Lagereintragssysteme ggf. entfallen. Ist dies nicht möglich (d. h. oberirdische Lager), wird der Brennstoff nach dem Abkippen manuell oder automatisch eingelagert. Dazu werden häufig Front- oder Radlader eingesetzt. Bei Lagerung in Hochbehältern erfolgt die Befüllung über Förderbänder, Schnecken, Kratzkettenförderer oder Fördergebläse /3-20/. Allerdings müssen hierzu neben dem Lager häufig Abladegruben bzw. -mulden eingebaut sein, in die der Brennstoff vom Lieferfahrzeug abgekippt wird. Falls erforderlich, kann der Brennstoff während der Einlagerung auch mit Hilfe von Wurfeinrichtungen (Schleuderrädern) in entlegene Winkel verteilt werden, um den Lagerraum besser auszunutzen. Werden Brennstoffe mit Containerfahrzeugen angeliefert, so sind die in Abb. 3.30 dargestellten Abmessungen als Orientierungswerte zu beachten.

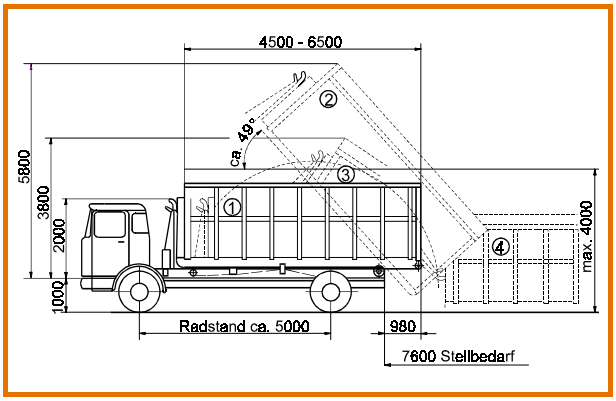


Abb. 3.30: Typische Abmessungen und Schwenkradien eines Abrollkippers mit Container beim Herausfahren (1), Abkippen (2), Abrollen (3) und im abgesetzten Zustand (4) (in mm) (nach Meiller /3-34/)

3.4.2.3 Pellets

Für Hackschnitzel geeignete überdachte und trockene Lagerräume sind prinzipiell auch für Pellets verwendbar. Da Pellets aber deutlich günstigere Materialeigenschaften aufweisen, kann der Aufwand für die Lagerung geringer gehalten werden. Das liegt vor allem an der hohen Schüttdichte, sie liegt bei Pellets mit über 600 kg/m^3 etwa dreimal so hoch wie bei trockenen Holzhackschnitzeln (ca. 160 bis 280 kg/m^3). Dadurch ist der Raumbedarf für eine bestimmte Energiemenge relativ gering (Kapitel 4.4). Hinzu kommt, dass eine Belüftung des Lagers bei Pellets nicht erforderlich ist, da ihr Wassergehalt bei weniger als 12 % liegt (nach DIN 51 731 /3-7/). Der Schutz vor Feuchtigkeit von außen ist aber bei Pellets besonders wichtig, da sie zerfallen können und die Schimmelbildung einsetzt. Außerdem sind spezielle Pelletfeuerungen meist auf stabile und trockene Presslinge angewiesen.

Manuelle Lagerentnahme. Die Gestaltung des Lagers ist abhängig von der Art des Weitertransports zur

Feuerung. Wenn dieser manuell, d. h. mit Schubkarren, Säcken oder Eimern erfolgt, (z. B. bei einem Pelletofen im Wohnzimmer), genügt ein gut zugänglicher trockener Lagerraum. Für die Bevorratung der Pellets werden dann (je nach Anbieter) eingesetzt:

- Kleinsäcke von je 15 bis 20 kg. Sie sind bei Lieferung einzeln abzuladen oder werden auf Paletten gestapelt angeliefert.
- Großkartons auf Einwegpaletten (ca. 850 kg)
- Großsäcke („Big Bags“) als Ein- oder Mehrweggebinde mit ca. 800 bis 1 200 kg Füllmenge. Diese Säcke können stehend mit der Entnahmeöffnung oben oder auch als spezielle trichterförmig vernähte Säcke hängend gelagert werden, wobei die Entnahme unten erfolgt.
- Mehrwegcontainer
- Kleinsilos, z. B. als Trevira-Silo (Kunststoffgewebe) in einem Stahlgerüst, mit Auslaufschieber (vgl. Abb. 3.32)

Automatische Ein- und Auslagerung. Aus Gründen des gestiegenen Komforts werden Zentralheizungsanlagen für Holzpellets heute überwiegend mit einer durchgehend mechanisierten Brennstoffbeschickung ausgestattet. Die Abnehmer werden mit Hilfe von Pumpwagen beliefert, mit denen der Brennstoff pneumatisch eingebracht wird (Abb. 3.31). Diese Anlieferung erleichtert die Einlagerung beim Endverbraucher, indem das Schüttgut durch einen Luftstrom über einen zum Teil bis zu 50 m langen flexiblen Schlauch auch in weniger leicht zugängliche oder erhöhte Lagerräume eingeblasen werden kann. Allerdings sollte die Schlauchentfernung von der Hauseinfahrt bis zum Befüllstutzen möglichst nicht über 30 m liegen. Der Abnehmer erhält jeweils die komplette Füllung einer oder mehrerer Kammern des Pumpwagens (z. B. 6 m^3 pro Kammer). Die Anfahrtswege müssen für die typischen Abmessungen eines Pumpwagens (ca. 10 m Länge, 2,6 m Breite und 3,4 m Höhe) und für dessen Gesamtgewicht (10 bis 18 t) geeignet sein.

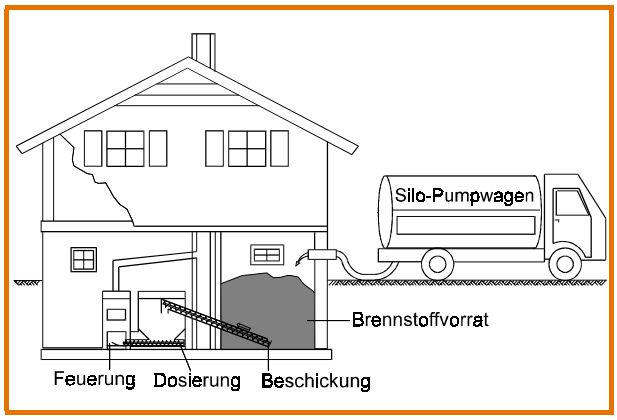


Abb. 3.31: Pelletanlieferung mit Pumptankwagen /3-20/

Um einen automatischen Lageraustrag zu gewährleisten, ist der Lagerraum so zu gestalten, dass die Pellets an einem tiefen Punkt zusammenfließen, so dass sie von dort über eine Schnecke oder über ein pneumatisches Absaugsystem entnommen werden können. Um das zu gewährleisten, erfolgt die Lagerung in

- Kleinsilos mit Wandmaterial aus Holz, Metall oder Gewebe,
- in Lagerräumen mit Schrägbodenauslauf und
- in Erdtanks.

Kleinsilos. Die verwendeten Kleinsilos unterscheiden sich prinzipiell nicht von den für Hackschnitzel eingesetzten Silos. Bei Pellets kann aber auf bewegliche Teile wie Blattfederrührwerke oder Schubböden (vgl. Kapitel 3.4.3) verzichtet werden; statt dessen genügt ein konischer oder trichterförmiger Auslauf mit einem Absperrschieber. Der Auslauf mündet in der Regel in einen Schneckentrichter oder eine Luftstromschleuse, von wo aus der mechanische bzw. pneumatische Weitertransport zur Feuerungsanlage erfolgt.

Eine kostengünstige Lagervariante stellen die sogenannten Trevira-Silos dar. Hierbei handelt es sich um einen Hochbehälter mit Wandungen aus Kunststoffgewebe (Trevira). Ein zu einem Sack mit konischem Auslauf und quadratischem Querschnitt vernähtes Gewebe wird dabei in ein vor Ort montierbares Stahlgerüst gehängt, das im Wesentlichen aus einem quadratischen Spreizrahmen besteht (Abb. 3.32). Derartige Silos werden in Größen bis ca. 2,5 x 2,5 m und bis zu 5 m Höhe angeboten. Der Vorteil dieser Lagerart liegt unter anderem in der atmungsaktiven Silowand. Bei der für Pellets üblichen pneumatischen Befüllung ist somit bei solchen Trevira-Silos keine zusätzliche Rückabsaugung des eingeblasenen Transportluftstroms erforderlich, da das Gewebe wie ein Filter wirkt, durch das nur saubere Luft passieren kann. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass eventuell gebildete Brennstoffbrücken durch Stöße gegen das Gewebe leicht gelockert werden können. Generell treten solche Brennstoffbrücken bei Holzpellets aber nur selten auf.

Pelletlagerräume. Beim Endverbraucher werden Pellets häufig in speziellen Pelletlagerräumen gelagert, deren Anforderungen seit kurzem auch in einer Norm festgelegt sind (ÖNORM M7137 /3-42/). Bei diesen

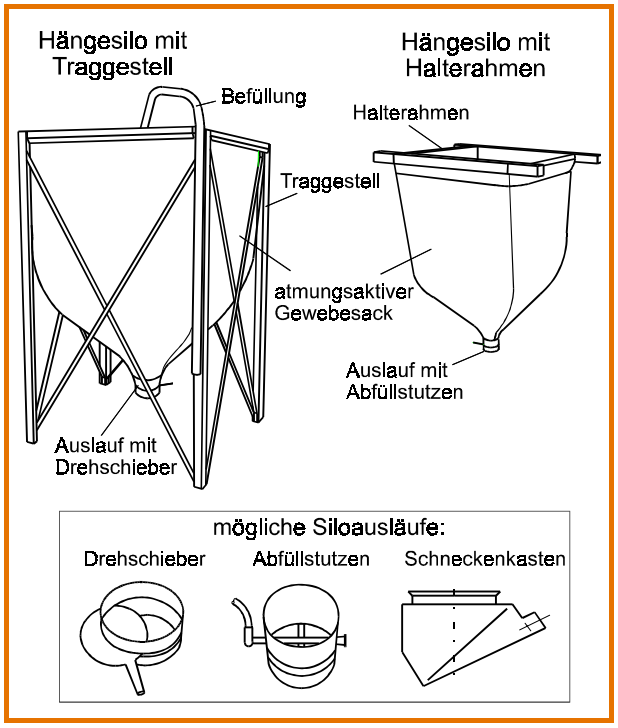


Abb. 3.32: Hängende Gewebesilos (aus Trevira) in verschiedenen Ausführungen

Lagerräumen handelt es sich meist um umgebaute Kellerräume in unmittelbarer Nachbarschaft zum Aufstellraum der Feuerung. Durch die pneumatische Befüllung wird eine relativ hohe Lagerraumausnutzung erreicht. Trotz der flexiblen Schlauchbefüllung sollte der Raum aber an die Außenmauer des Gebäudes angrenzen.

Als Richtwert für das erforderliche Fassungsvermögen kann das 1,2- bis 1,5-fache des Jahresbedarfs herangezogen werden. Dies entspricht bei den meisten Einfamilienhäusern (mit 150 m² Wohnfläche) einem Lagerraumvolumen von ca. 6 m^3. Als Faustregel gilt, dass für 1 kW Heizlast etwa 0,9 m^3 Lagerraum (inkl. Leerraum) anzusetzen sind /3-3/.

Der Lagerraum sollte für die auftretenden Wandlasten ausgelegt sein (z. B. 10 cm Beton oder 12 cm Ziegel, beidseitig verputzt). Nicht geeignet sind Gasbeton-Konstruktionen /3-43/. Er sollte unbedingt staubdicht verschließbar sein, da beim Befüllvorgang feine Stäube aufwirbeln, die sonst leicht in Wohn- oder Nebenräume gelangen könnten. Zwar ist in jedem Fall eine gleichzeitige Absaugung der Abluft durch das Pumpfahrzeug während der Anlieferung sicherzustellen (außer bei Trevira-Silos, siehe oben), jedoch kann eine vollkommene Staubfreiheit auch bei Pellets mit hoher Abriebfestigkeit nicht völlig sichergestellt werden. In der Nähe des Befüllstutzens sollte sich ein Stromanschluss befinden, um ein Absauggebläse für den beim Einblasen entstehenden Staub anschließen zu können.

Rechteckige Lagerraumgrundrisse sind von Vorteil. Die Pellets sollten von der schmalen Raumseite her eingeblasen werden, um eine gleichmäßige Befüllung zu gewährleisten. Dabei beträgt der Abstand zwischen Befüll- und Ansaugstutzen mindestens 50 cm. Bei Lagerräumen, die von der breiten Seite her befüllt werden sollen, sind die Stutzen weiter auseinander (ca. 1/3 der Raumbreite), damit sie wechselseitig zum Befüllen und Entleeren genutzt werden können.

Die Befüllstutzen müssen von außen zugänglich sein (Abb. 3.33). Als Anschluss haben sich Feuerwehrschlauchstutzen nach DIN A 14309 („Storzgröße A“) durchgesetzt. Die Stutzen sollten an einen Potenzialausgleich (Erdung) angeschlossen sein. Die spätere Entnahme der Pellets aus dem Lagerraum erfolgt meist über Schnecken oder ebenfalls über pneumatische Systeme (Kapitel 3.4.3).

Aus Brandschutzgründen sollte auf Elektroinstallationen im Lagerraum verzichtet werden, sofern es sich nicht um explosionsgeschützte Ausführungen handelt. Das gilt auch in Lagerräumen bis 15 t Brennstoff, für die bislang noch keine Feuerschutzauflagen gelten. Einzelheiten zu den rechtlichen Anforderungen bei der Lagerung von Festbrennstoffen werden in Kapitel 8.2.2 dargestellt. Empfehlungen für die Lagergestaltung zeigt Abb. 3.34.

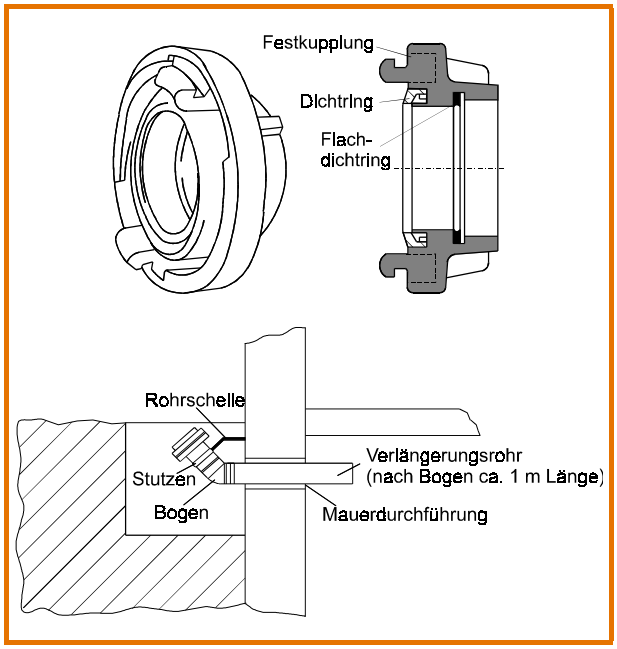


Abb. 3.33: Befüllstutzen (oben) und Einbaubeispiel (unten) im Lichtschacht eines Holzpellet-Lagerraums (z.T. nach Windhager /3-55/)



Tabelle 3.6: Merkmale und Kenndaten ausgewählter automatischer Lageraustragssysteme für Kleinanlagen /3-20/

Austragssystem	Lager-grundriss	Lagergröße	Art des Lagergutes	max. Lager-höhe in m	Leistung in m^3/h
Schrägboden/ Trichterauslauf	rund, eckig	∅ bis ca. 4 m	Pellets, Körner-Brennstoffe mit guten Fließeigenschaften (daher für Hackschnitzel ungeeignet)	> 20	
Blattfeder-rührwerk	rund, eckig	∅ 1,5 bis 4 m	feine/mittlere Hackschnitzel (rieselfähig)	6	3
Konusschnecke	rund (eckig)	Pendelwirkdurchmesser 2 bis 5 m	trockene, feine bis mittlere Hack-schnitzel, bis ca. 50 mm Länge	10	5
Dreh- oder Aus-tragsschnecke	rund (eckig)	∅ 4 bis 10 m	feine bis mittlere Hackschnitzel bis 100 mm Länge, Späne	20	50
Schubboden	rechteckig, länglich	keine Begrenzung (parallele Schubböden)	leichte bis schwerste Güter, auch sehr grob	10	20

erfolgt dann meist über Schnecken oder über pneumatische Entnahmesysteme. Sie fördern den Brennstoff in der Regel zunächst in einen Vorratsbehälter neben oder an der Feuerung. Das Gleiche gilt auch, wenn pneumatische Entnahmesysteme verwendet werden. An Stelle der Schnecke sind hierbei eine oder mehrere Absaugsonden an der tiefsten Stelle des Lagers angebracht, diese sind an einen Gebläseförderer angeschlossen (Abb. 3.37).

Der Lageraustrag wird eingeschaltet sobald der Füllstand im Zwischenbehälter abgesunken ist. Dies geschieht manuell oder automatisch über einen Füllstandsmelder. Wenn an der Feuerung kein Zwischenbehälter vorhanden ist, kann die Austragschnecke auch mit der Zuführschnecke über einen Fallschacht verbunden sein, um eine quasi-kontinuierliche direkte Schneckenbeschickung der Feuerung zu gewährleisten.

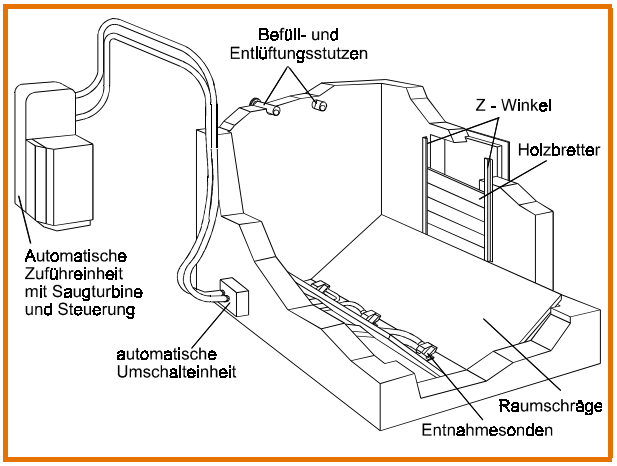


Abb. 3.37: Schrägbodenauslauf mit pneumatischer Pelletentnahme im Luftstrom (nach Windhager /3-55/)

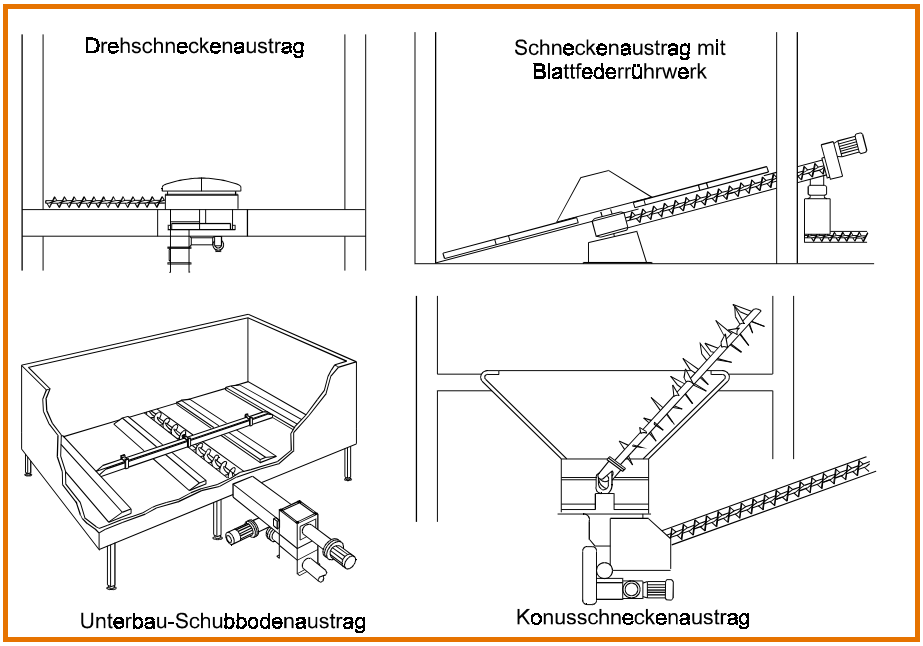


Abb. 3.36: Silo- und Raumaustragssysteme für quadratische und runde Lagerquerschnitte bei kleineren und mittleren Hackschnitzellagern /3-20/

Blattfederrührwerke. Bei kleineren Feuerungsanlagen mit Hochbehältern sind vorgefertigte Silo-Unterbau-Austragseinrichtungen weit verbreitet (Abb. 3.36). Um Förderunterbrechungen durch Brückenbildung zu vermeiden, wird dabei ein möglichst großer Entnahmequerschnitt angestrebt. Das wird häufig durch Blattfederrührwerke erreicht, bei denen sich ein Blattfederpaar im Falle einer Hohlraumbildung am Siloboden entspannt und während der

Rührarbeit radial ausbreitet. Dadurch werden auch weiter außen liegende Brennstoffschichten gelockert und ausgetragen, bis die hohl liegende Schüttung von oben nachrutscht. Unterhalb der Rotationsebene der Blattfedern verläuft die Entnahmeschnecke, die sich in einem nach oben offenen Bodenschacht befindet. Je nach Wartungsansprüchen verläuft die Austragsebene entweder waagerecht oder als schiefe Ebene. In Kapitel 6.2.2 werden einige in der Praxis übliche Einbaubeispiele für einen Silounterbau dargestellt.

Dreh- und Konusschnecken. Die gleiche Funktion wie der Blattfeder-Schneckenaustrag erfüllen auch Dreh- oder Konusschnecken (Abb. 3.36). Drehschnecken bewerkstelligen neben der Lockerungsarbeit auch den radialen Transport beispielsweise der feuchten oder trockenen Hackschnitzel zum zentralen Entnahmepunkt. Konusschnecken arbeiten dagegen in geneigter Stellung und erfüllen eher eine Rührwerksfunktion für den selbsttätig nachrutschenden meist trockenen Hackschnitzelbrennstoff. Der Wirkdurchmesser dieser auch als Pendelschnecke bezeichneten Rühreinrichtung kann bei 2 bis 5 m liegen. Bei rechteckigen Siloquerschnitten besteht bei diesen Austragssystemen jedoch der Nachteil, dass der Lagerraum nie vollständig automatisch entleert werden kann.

Dreh- oder Austragsschnecken sind am äußeren Grat der Schneckenwendel meist mit Mitnehmern bestückt, die das Lockern und Ablösen des Brennstoffs aus dem Materialverbund im Lager unterstützen. Für besonders hohe Förderleistungen werden auch Schneckenpaare verwendet, die den Brennstoff von zwei Seiten her zum Drehpunkt hin fördern.

Schubböden. Im Unterschied zu den genannten Techniken decken Schubbodenausträge den gesamten (rechteckigen) Lagerbodenbereich ab. Sie besitzen eine oder mehrere Schubstangen mit Mitnehmern, die horizontal vor- und zurückbewegt werden. Die Schubstangen werden mit Hydraulikzylindern angetrieben, die außerhalb des Lagerraums arbeiten. Durch die keilförmige Form der Mitnehmer wird der Brennstoff in Richtung einer stirnseitig oder mittig verlaufenden Querrinne geschoben, in der sich z. B. ein Schnecken- oder Kettenförderer befindet, der den Brennstoff dann zur Feuerung transportiert. Schubböden zeichnen sich u. a. durch hohe Betriebssicherheit und Unabhängigkeit von Form und Größe des Brennstoffs aus, sie werden deshalb auch häufig in größeren Feuerungsanlagen verwendet. In Kleinanlagen kommt das Schubbodenprinzip lediglich als vorgefertigter Silo-Unterbau für kleinere Hochlager zum Einsatz (Abb. 3.36), es kann aber auch in Wechselcontainern verwendet werden.

Fördersysteme. Bei der Förderung von Biomasse wird zwischen pneumatischen Systemen (Förderung im Luftstrom) und mechanischen Systemen unterschieden. In der Praxis der Kleinfeuerungen ist die mechanische Förderung mit Schnecken am meisten verbreitet, sowohl zur Entnahme als auch zur Anlagenbeschickung (Tabelle 3.7). Der Förderdurchsatz ist dabei unter anderem von der Neigung der Förderstrecke abhängig; sie bestimmt die Füllhöhe zwischen den Schneckenwindungen. Feinere Materialien (Pellets, Körner) neigen bei Gefällestrecken zudem zum Zurückrieseln (Schlupf), was ebenfalls die Förderleistung mindern kann.

Für größere Anlagenleistungen oder bei problematischeren Materialien (z. B. gröberes Hackgut) kommen auch andere Systeme wie z. B. Kratzkettenförderer, Schwingförderer (Vibrorinnen) oder Förderbänder zum Einsatz. Pellets werden häufig auch pneumatisch gefördert.

3.5 Trocknung

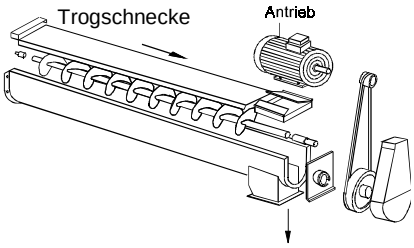
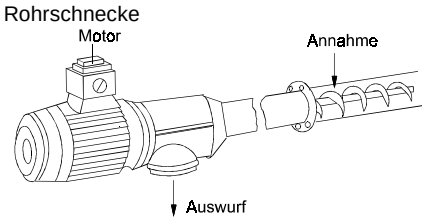
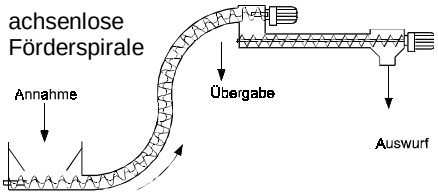
Die Trocknung des Brennstoffs stellt nicht nur eine Konservierungsmethode dar, sie führt auch zu weitergehenden Vorteilen wie Heizwertsteigerung, Gewichtsminderung oder Qualitätsverbesserung. Für viele Anwendungen (Feuerungssysteme) ist die Trocknung auch eine unverzichtbare Grundvoraussetzung. Im Folgenden werden zunächst die Grundlagen und anschließend die technische Umsetzung der Trocknung dargestellt.

3.5.1 Grundlegendes zur Trocknung

Bei der technischen Trocknung wird ein Trocknungsmedium (z. B. Luft, Abgas) durch oder über das Trocknungsgut geleitet. Hierbei ist die Wasseraufnahmefähigkeit des Trocknungsmediums entscheidend, es kann umso mehr Wasser aufnehmen, je wärmer und trockener es ist.

Durchströmt Luft das feuchte Gut, ist sie bestrebt, in einen Gleichgewichtszustand zu gelangen, bis sich auch bei Fortsetzung der Belüftung keine weiteren Veränderungen in der Luftfeuchte oder im Wassergehalt des Gutes mehr ergeben. Dies gilt im umgekehrten Sinne auch, wenn feuchte Luft durch einen trockenen Gutstock geleitet wird. Im Gleich-

Tabelle 3.7: Bauart und Verwendung von Schneckenfördersystemen (nach /3-20/)

Bauart	Merkmal bzw. Einsatzzweck
	- U-förmiger Querschnitt, nach oben flach, Deckel abnehmbar - für horizontale oder leicht geneigte gerade Strecken - Einsatz für feine bis grobe homogene Schüttgüter (ohne Überlängen)
	- Bauart wie Trogschnecke aber runder Förderquerschnitt (Rohr), Reinigung durch Rückwärtslauf - für horizontale oder leicht geneigte gerade Strecken - Einsatz für trockene, leicht rieselfähige Güter (Pellets, Körner)
	- Ausführung der Förderwendel als achsenlose Spirale (daher auch „seelenlose Schnecke“) - für gebogene Förderwege - Einsatz für trockene, leicht rieselfähige Güter (Pellets, Körner)

gewichtszustand ist der Wassergehalt vor allem von der relativen Luftfeuchtigkeit abhängig.

Trocknungsvermögen von Luft. Eine Grundlage für die Planung und Dimensionierung von Trocknungsanlagen bildet das sogenannte H,x-Diagramm. Es zeigt die Abhängigkeiten von Temperatur, Wassergehalt, relativer Luftfeuchtigkeit und Energiegehalt (Enthalpie) der Luft (Abb. 3.38). Damit lässt sich die maximal erreichbare Wasseraufnahme der Trocknungsluft bestimmen. Daraus wiederum ergibt sich die notwendige Luftmenge und die erforderliche Gebläseleistung.

Beispielsweise hat Außenluft mit 18 °C und 50 % relativer Luftfeuchtigkeit einen Wassergehalt von ca. 6,3 g/kg Luft. Bei der Belüftungstrocknung wird diese Luft mit Wasser möglichst maximal aufgesättigt. Ohne Enthalpieänderung könnte Luft unter diesen Bedingungen maximal 8,8 g/kg aufnehmen; das entspricht in diesem Fall einem maximalen Trocknungsvermögen von 2,5 g/kg.

Durch eine Erwärmung dieser Luft um beispielsweise 3 Kelvin auf 21 °C sinkt die relative Luftfeuchtigkeit auf 40 % und die maximal mögliche Wasseraufnahmefähigkeit steigt auf 9,5 g/kg Luft. Dadurch steigert sich das Trocknungsvermögen – verglichen mit dem der nicht angewärmten Luft – um 0,7 auf 3,2 g/kg Luft. Daraus errechnet sich mit dem spezifischen Gewicht der Luft (1,2 kg/m^3) ein Wasseraufnahmevermögen der angewärmten Trocknungsluft von 3,8 g/m^3.

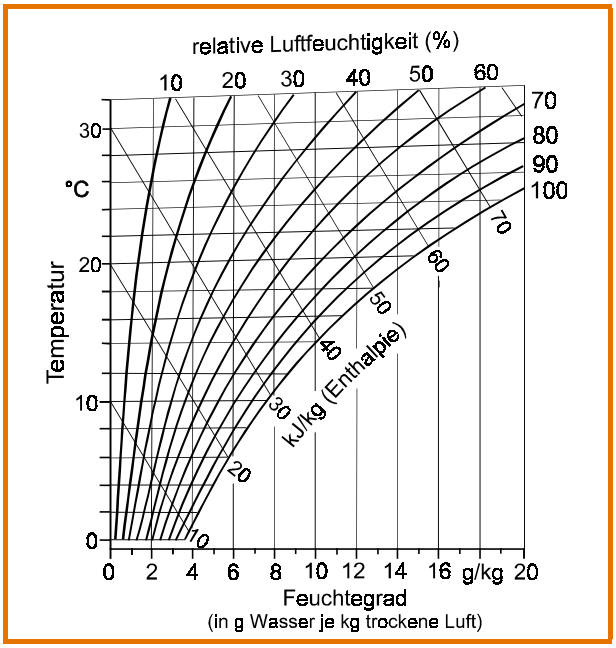


Abb. 3.38: Ausschnitt aus dem H,x-Diagramm nach Mollier (vgl. /3-29/)

Trocknungsverlauf und Dauer. Bei der Verdunstung wird der Trocknungsluft je Gramm Wasser eine Wärmemenge von 2,441 kJ (ca. 0,7 Wh) entzogen. Eine weitere Abkühlung erfolgt meist an kühleren Gutschichten oder an der kalten Wand des Trocknungsbehälters. Bei Zwangsbelüftungssystemen mit ruhender Schüttung (z. B in den normalerweise verwendeten Satztrocknern, vgl. Kapitel 3.5.3) kommt es daher vor allem bei frisch eingelagerter Biomasse zur Ausbildung einer Trocknungs- und Kondensationszone, die mit der Luftführung im Gutstock voranschreitet. Solche Kondensationseffekte treten zu Beginn des Trocknungsvorganges auf und sind bei einer großen Schütthöhe besonders ausgeprägt. In diesem Fall befindet sich der äußere Teil des Brennstoffs über eine lange Zeit im Kondensationsbereich, wo es durch die zusätzliche Befeuchtung auch zu einem vermehrten Pilzwachstum kommen kann.

Die maximale Trocknungsleistung einer Anlage (in kg Wasser pro Stunde) ergibt sich aus dem Trocknungspotenzial der Luft (in kg Wasser je m^3 Luft) multipliziert mit dem Volumenstrom (m^3/h).

Für die Abschätzung der Mindest-Trocknungsdauer wird außerdem die insgesamt abzutrocknende Wassermasse eines Gutstocks benötigt (Δm). Sie errechnet sich nach der in Gleichung (3-1) dargestellten Zahlenwertgleichung; darin beschreibt w_1 den Ausgangswassergehalt und w_2 den Endwassergehalt in % (Nassbasis) und m_1 die Frischmasse bei Trocknungsbeginn.

$$\Delta m = m_1 \cdot \frac{w_1 - w_2}{100 - w_2} \qquad (3\text{-}1)$$

Die Mindesttrocknungsdauer ergibt sich dann aus der Trocknerleistung (in kg Wasser/h) multipliziert mit der insgesamt abzutrocknenden Wassermasse (Δm). Da aber der Sättigungsgrad der Abluft im Verlauf der Trocknung durch zunehmende Wasserbindungskräfte sinkt, entspricht das tatsächliche Trocknungspotenzial nicht immer dem maximalen Aufnahmevermögen der Luft. Somit stellt die Mindest-Trocknungsdauer lediglich einen Orientierungswert dar.

Strömungswiderstand. Beim Durchleiten der Gebläseluft durch eine Schüttung muss der jeweilige Strömungswiderstand des Materials überwunden werden. Er ist abhängig von der Durchströmlänge (Schichthöhe), der gewünschten Strömungsgeschwindigkeit und der Gutart. Letztere wiederum wird durch die Größe und die Form der Einzelteilchen sowie durch die Schüttdichte (Verdichtung) beeinflusst. Da bei Schütthöhen von weniger als 2 m näherungsweise ein linearer Zusammenhang zwischen dem Strömungswiderstand und der Durchströmlänge angenommen werden kann /3-33/, wird der spezifische Strömungswiderstand meist bezogen auf 1 m Schichthöhe angegeben. Für feine Holzhackschnitzel (ca. 28 mm Nominallänge) kann ein Belüftungswiderstand von ca. 40 Pa pro Meter Schütthöhe bei 0,1 m/s Luftgeschwindigkeit angenommen werden. Bei Grobhackgut (z. B 50 bis 100 mm Länge) sinkt dieser Wert auf ca. 10 bis 25 Pa/m /3-28/.

In der Praxis werden dazu aber meist Sicherheitszuschläge hinzuaddiert, da – je nach Schichthöhe – im Trockner eine mehr oder weniger starke Verdichtung des gelagerten Materials stattfindet. Bei Holzhackgut wird beispielsweise i. Allg. von einem etwa 20-prozentigen Zuschlag ausgegangen /3-6/; die angestrebte Luftgeschwindigkeit liegt bei 0,05 bis 0,15 m/s.

Der Strömungswiderstand ist für die Auswahl und Auslegung des benötigten Gebläses bzw. dessen Leistung entscheidend. Aus der Gebläsekennlinie, die für das verwendete Gebläse vorliegen sollte (ggf. beim Hersteller erfragen), lässt sich dann die tatsächliche Lüfterleistung in Abhängigkeit vom jeweils vorliegenden Gesamtdruck (Belüftungswiderstand der gesamten Schütthöhe) ablesen.

3.5.2 Trocknungsverfahren

Bei den Trocknungsverfahren wird unterschieden zwischen einer natürlichen Trocknung (d. h. ohne technische Hilfe) und einer Belüftungstrocknung (d. h. mit entsprechenden technischen Verfahren). Beide Varianten werden nachfolgend vorgestellt.

3.5.2.1 Natürliche Trocknung

Ohne klimatechnische Einrichtungen können organische Stoffe durch Bodentrocknung, natürliche Konvektionstrocknung oder durch Selbsterwärmung getrocknet werden. Meist werden diese unterschiedlichen Varianten miteinander kombiniert. Sie werden nachfolgend erläutert.

Bodentrocknung. Das Ausbreiten des Trocknungsgutes auf einer Fläche wird als Bodentrocknung bezeichnet. Dieses einfache, in der Grünlandwirtschaft gebräuchliche Prinzip, findet auch bei der Restholztrocknung im Wald Anwendung. Waldholz fällt im Frischzustand mit einem durchschnittlichen Was-

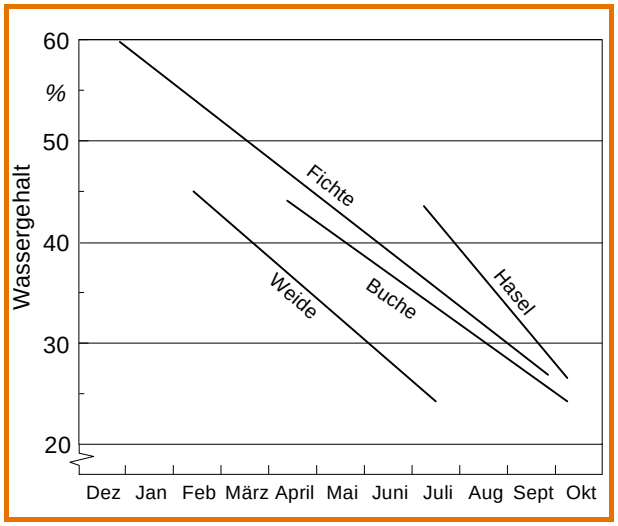


Abb. 3.39: Trocknungsverlauf verschiedener Hölzer bei unaufbereiteter Zwischenlagerung während des Sommers im Freien (nach /3-24/)

sergehalt von ca. 45 (Buche) bis 55 % (Fichte) an /3-6/. Wird das Holz im belaubten Zustand gefällt („Sauerfällung"), verläuft die Austrocknung schneller als nach dem Blattabwurf, da ein großer Teil des in der Holzmasse enthaltenen Wassers noch über die Blattmasse abgegeben wird. Auch entrindetes oder gespaltenes Holz trocknet auf Grund der größeren Oberfläche schneller aus. Beispielsweise kann Rohholz, das im Freien gelagert wird, innerhalb des Sommerhalbjahres auf Wassergehaltswerte von unter 30 % abtrocknen (Abb. 3.39). Das gilt jedoch meist nicht unter den relativ ungünstigen mikroklimatischen Bedingungen eines Waldbestandes.

Prinzipiell ist auch bei Holzhackgut eine Bodentrocknung möglich. Bei guter Sonneneinwirkung und sehr geringer Schütthöhe kann eine Abtrocknung auf Wassergehalte von ca. 20 % bereits innerhalb eines Tages erfolgen. Allerdings wird dazu eine große befestigte Fläche benötigt, und das Material muss ggf. gewendet werden.

Trocknung durch natürliche Konvektion. Bei Stapelgut erfolgt die Trocknung hauptsächlich durch eine natürliche Luftströmung durch das Material. Frisches Scheitholz ist dadurch nach 1 bis 2 Jahren ausgetrocknet. Auch grobes Schüttgut kann durch natürliche Konvektion in speziellen Behältern getrocknet werden. Solche freistehend aufgestellten, überdachten Lagerbehälter („Harpfen") besitzen als Seitenwände einen Lattenrost oder ein Gitterwerk. Sie sind meist einige Meter hoch (Frontladerhöhe) und nicht breiter als 1 m. Als Aufstellort ist ein möglichst sonniger, windiger Platz zu wählen. Die Harpfen, die auch vom Hacker direkt befüllt werden können, dienen gleichzeitig auch als Lagerplatz. Sie kommen vor allem für Kleinverbraucher in Frage.

Trocknung durch Selbsterwärmung. Bei Schüttgütern wird die natürliche Konvektion in vielen Fällen durch die Selbsterwärmung im Gutstock unterstützt. Die aus dem Abbau von organischer Substanz stammende Wärme (Kapitel 3.4.1) erzeugt in der Schüttung eine aufwärts gerichtete Luftbewegung, so dass kühlere Luft von unten oder von der Seite nachströmt. Dazu ist es von Vorteil, wenn der Lagerboden luftdurchlässig ist (z. B. durch Luftschächte oder Rundholzschlitze, vgl. Abb. 3.40). Bei sehr grobem Hackgut (z. B. mit Schneckenhacker) kann auf diese Weise eine effiziente Austrocknung ohne größere Substanzverluste stattfinden, wobei in diesem Fall die Selbsterwärmung im Lagergut lediglich zu einer Temperaturerhöhung von maximal 20 Kelvin führt /3-10/.

Generell ist aber die unterstützende Wirkung der Selbsterwärmung ohne aktive Belüftung mit erheblichen Risiken verbunden (Kapitel 3.4.1). Bei mittlerem und feinem Hackgut sollten Selbsterwärmungseffekte daher nur in Kombination mit technischen Belüftungssystemen ausgenutzt werden. Solche Verfahren werden nachfolgend vorgestellt.

3.5.2.2 Trocknung durch Belüftung

Belüftungskühlung. Bei der Belüftungskühlung findet eine Zwangsbelüftung mit kalter Außenluft statt. Durch die Selbsterwärmung im Brennstoff erhöht sich das Sättigungsdefizit der Luft und damit steigt ihr Wasseraufnahmevermögen. Durch intermittierende Belüftung wird nun die feuchte Luft im Brennstoff

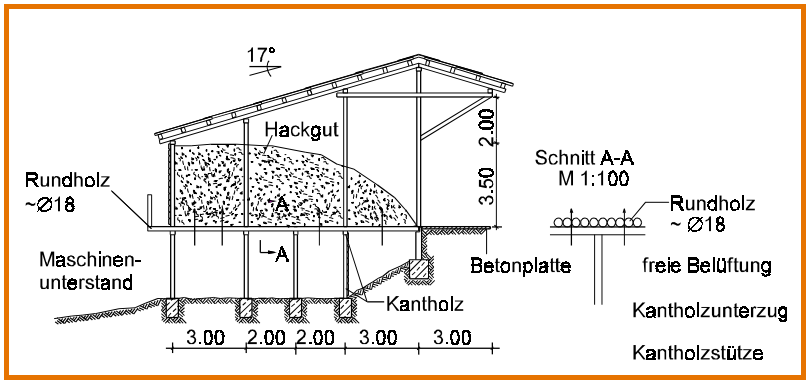


Abb. 3.40: Beispiel für Lagerhalle mit durchlüfteten Boxen zur erleichterten Selbstdurchlüftung

durch neu zugeführte Gebläseluft verdrängt; dadurch kühlt sich der Brennstoff ab. Die Belüftungszyklen sind meist temperaturgesteuert und setzen erst ab einer Temperaturdifferenz zur Außenluft von ca. 5 bis 10 Kelvin ein. Dadurch bleibt der Fremdenergieeinsatz für den Gebläsebetrieb gering; allerdings ist hierfür ein gewisser Substanzverlust des gelagerten Materials in Kauf zu nehmen (Kapitel 3.4.1). In der kalten Jahreszeit ist der Wasserentzug bei dieser Methode zwar gering; dennoch ermöglicht sie auch im Winter einen schnelleren Trocknungsfortschritt als bei der kontinuierlichen Kaltbelüftung. Da die Selbsterwärmung mit zunehmender Trocknungsdauer abnimmt, verlangsamt sich auch der Trocknungsprozess.

Belüftungstrocknung. Mit Beginn der warmen Jahreszeit steigt das Sättigungsdefizit der Außenluft an, so dass auch mit kontinuierlicher Belüftung eine Trocknung realisiert werden kann. Eine derartige Belüftungstrocknung kann beispielsweise im Anschluss an eine Belüftungskühlung erfolgen. Mit einem Trocknungsgebläse wird dabei Außenluft durch das Trocknungsgut gedrückt. Mit zunehmenden Außentemperaturen beschleunigt sich der Trocknungsvorgang. Auch technische Maßnahmen, die die Lufttemperatur um wenige Grad Celsius erhöhen, wirken sich positiv aus. Einen kleinen Temperaturbeitrag leistet hierzu schon die Wärmeentwicklung aus dem Gebläsebetrieb und die Luftreibung; er wird auf <1 bis maximal 5 °C beziffert /3-6/, /3-54/. Empfehlenswert ist die Verwendung von Lüftungsabwärme (z. B. aus der Raum- oder Stallbelüftung). Auch solar aufgewärmte Trocknungsluft ist nutzbar; hierzu zählt auch die Luftabsaugung aus dem Dachraum von Betriebsgebäuden (Abb. 3.41). In Witterungsperioden mit hoher relativer Luftfeuchtigkeit oder auch nachts sollte die Belüftung unterbrochen werden, um eine Wiederanfeuchtung des Brennstoffs zu verhindern.

Damit eine optimale Luftführung in der Schüttung erreicht wird, sollte ihre Oberfläche möglichst eben sein; so werden Unterschiede im Strömungswiderstand minimiert. Aus diesem Grund wird für unterschiedliche Trocknungsgüter eine bestimmte Mindestschütthöhe empfohlen; beispielsweise liegt sie für Hackgut bei ca. 1 m.

Als Planungsgröße für die benötigte Luftmenge kann der spezifische Luftdurchsatz bezogen auf die Grundfläche der Schüttung herangezogen werden. Diese Größe besitzt die Dimension einer Geschwindigkeit, die bei Holzhackgut zwischen 180 und 540 m^3/h je m^2 Grundfläche bzw. zwischen 0,05 und

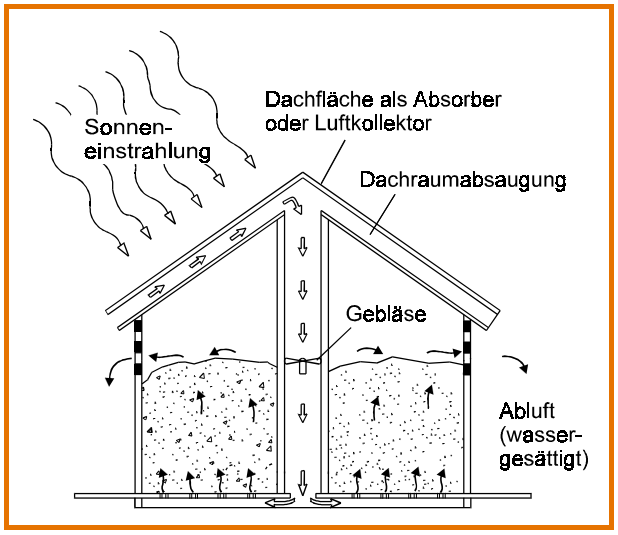


Abb. 3.41: Prinzip der Belüftungstrocknung mit vorgewärmter Luft aus der Dachraumabsaugung

0,15 m/s liegen sollte /3-54/. Als weitere Planungsgrundlage wird auch der auf das Schüttvolumen bezogene Luftdurchsatz, d. h. die Belüftungsrate, verwendet. Beispielsweise sollten bei Hackgut pro Stunde mindestens 40 m^3 Luft je m^3 Holz aufgewendet werden. Zur Beschleunigung des Trocknungsvorganges in der Praxis können die Belüftungsraten auf bis zu 150 $m^3/(h\ m^3)$ erhöht werden /3-54/. Entsprechend steigt auch die erforderliche Gebläseanschlussleistung an, wenn die Trocknungsgut-Menge nicht reduziert wird.

Warmlufttrocknung. Durch eine Luftvorwärmung kann der Trocknungseffekt der Belüftung deutlich verbessert und die Trocknung effizienter gestaltet werden. Die Warmlufttrocknung arbeitet folglich – im Unterschied zur Belüftungstrocknung – mit einer Luftanwärmung um 20 bis 100 Kelvin durch eine Wärmequelle höherer Leistung (abhängig u. a. von der zu trocknenden Menge, der verfügbaren Trocknungszeit und dem Anfangswassergehalt). Auch hier wird die Trocknungsluft mit einem Gebläse durch das Trocknungsgut gedrückt.

Neben speziellen Heizsystemen bietet sich für die Luftvorwärmung auch die Nutzung von Abwärme an. Letztere kann beispielsweise als Niedertemperaturwärme von Feuerungsanlagen anfallen. Daneben ist auch der Einsatz von Fremdenergieträgern (Öl-, Gas- oder Holzfeuerung) zur Erwärmung der Trocknungsluft möglich und üblich.

Die Entscheidung, ob eine Belüftungstrocknung mit Außenluft ausreichend ist oder eine Warmlufttrocknung benötigt wird, hängt u. a. wesentlich von der maximal verfügbaren Trocknungszeit ab. Diese

wiederum wird durch die meteorologischen Bedingungen, die Verderbsgefahr des Trocknungsgutes und die betrieblichen Rahmenbedingungen bestimmt.

3.5.3 Trocknungseinrichtungen

Die Trocknung von Holzhackschnitzeln erfolgt meist in Kombination mit der Lagerung und Bevorratung. Für die Nutzung in Kleinanlagen kommen durchweg Satztrockner zum Einsatz, das heißt es handelt sich um Systeme ohne Gutförderung /3-20/. Hierbei befindet sich das Trocknungsgut in Ruhe, während es über einen Belüftungsboden oder über spezielle Luftkanäle von unten her belüftet wird. Dabei handelt es sich entweder um Silos, die im Innen- und Außenbereich aufgestellt werden können, oder um kastenförmige Einbauten in Gebäuden. Nach Möglichkeit werden dabei Teile der Gebäudehülle als Trocknerwandung mitverwendet, oder das komplette Gebäude ist mit einem belüfteten Boden ausgestattet („Stapelraumtrockner"). In der Regel werden jedoch verschiedene Boxen oder Kästen abgetrennt, in denen die unterschiedlichen Partien separat voneinander getrocknet werden können (Abb. 3.44). Dadurch lässt sich bei Schüttgütern mit hohem Strömungswiderstand die erforderliche Gebläse- und damit die elektrische Anschlussleistung relativ niedrig halten.

Zur Minimierung von Umschlagsprozessen können Satztrockner auch mobil als Wagentrocknung ausgeführt sein (Abb. 3.43). Hierzu werden entsprechende Einbausätze angeboten. Dabei handelt es sich um einen Satz von Belüftungskanälen, die am Wagenboden aufliegen und über einen Hauptkanal mit Warmluft versorgt werden. Am Hauptkanal befindet sich ein Anschlussstutzen, an den mit Hilfe eines Schnellspannverschlusses ein flexibler Schlauch angeschlossen wird, der zum Warmlufterzeuger führt. Je nachdem, ob es sich um einen Seitwärts- oder einen Rückwärtskipper handelt, werden am Wagenboden 8 bis 11 bzw. nur 5 Luftschächte im Abstand von ca. 40 cm eingebaut. Je nach Wagenabmessungen liegen die Anschaffungskosten für einen solchen Einbausatz zwischen 1 300 und 2 000 €.

Häufig kommen auch Selbstbaulösungen für Wagentrocknungen zum Einsatz, bei denen der Boden eines Transportanhängers mit einem abnehmbaren verwindungsfähigen Lochboden ausgerüstet ist. Eine solche mobile Trocknung kann auch in Wechselcontainern (bis 40 m^3 Füllvolumen) verwirklicht werden, wenn diese Teil des Logistikkonzeptes sind und an der Feuerung ggf. Abwärme genutzt werden kann.

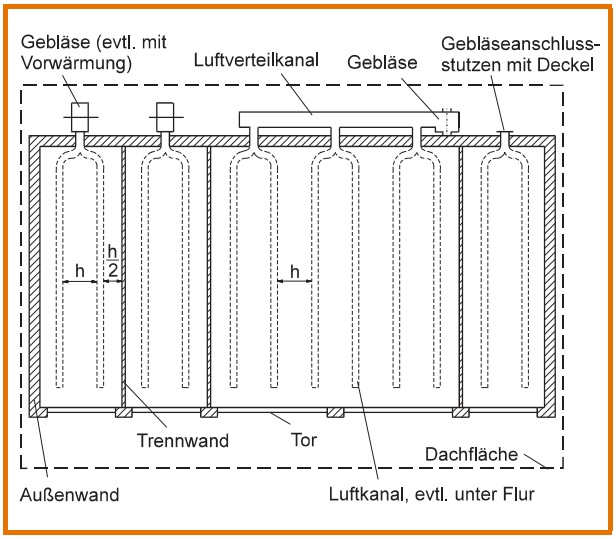


Abb. 3.42: Beispiel für die Anordnung von Belüftungsschächten bei Satztrocknern (h = Lagerhöhe = maximaler Kanalabstand), nach /3-51/

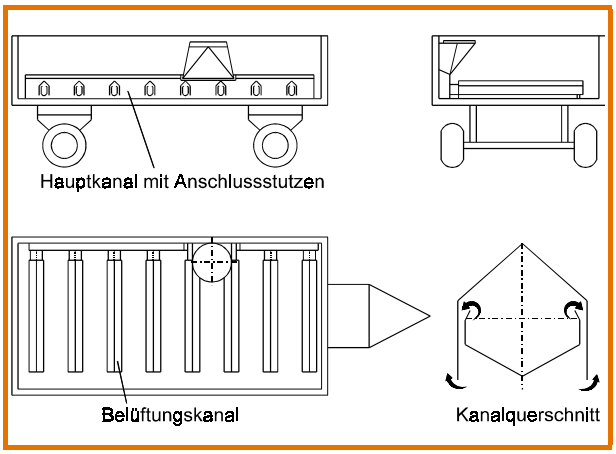


Abb. 3.43: Bauweise einer Wagentrocknung, hier: für Seitwärtskipper (nach /3-52/)

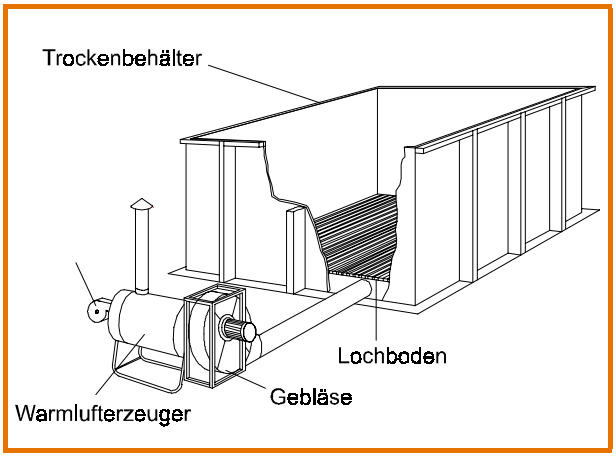


Abb. 3.44: Grundprinzip eines Satz- bzw. Kastentrockners /3-49/

Satztrockner, die als Flachtrocknungsanlagen ausgeführt sind, lassen sich meist über vorhandene Front- und Radlader (z. B. bei abnehmbaren Seitenwänden) oder durch Förderbänder bzw. durch Abkippen vom Transportfahrzeug relativ leicht befüllen bzw. entleeren. Bei Hochsilos ist die Beschickung und Entnahme dagegen aufwändiger. Für die Beschickung kommen hier Fördergebläse, Elevatoren oder Schnecken zum Einsatz. Die Entnahme des getrockneten Gutes erfolgt dagegen mit Drehschnecken, durch Blattfederausträge oder ähnliche Techniken (Kapitel 3.4.3).

Am Trocknerboden strömt die Luft über spezielle Belüftungsschächte ein. Fest eingebaute Unterflurschächte besitzen den Vorteil, dass das Befahren des Trockners mit Fahrzeugen problemlos möglich ist; dies erleichtert die Beschickung und die Entnahme des Trocknungsgutes. Ein Befahren ist dagegen nicht möglich, wenn Dachreiter oder flexible Dränrohre verwendet werden.

Ideale Luftverhältnisse herrschen, wenn der gesamte Trocknergrund als Lochboden ausgeführt ist. Bei einer Luftzufuhr über Schächte sollte der Kanalabstand nicht größer sein als die Schütthöhe im Trockner, damit in Bodennähe keine Bereiche mit unzureichender Durchlüftung entstehen (Abb. 3.42).

Zur Erzeugung des Luftstroms werden Axial- und Radialgebläse eingesetzt. Letztere kommen dann zum Einsatz, wenn es bei größeren Trocknerleistungen auf eine stabile und relativ hohe Druckerzeugung ankommt. Allerdings ist hierbei auch die Geräuschentwicklung höher als bei Axialgebläsen, die bei kleineren Gesamtdrücken zwischen 100 und 1 000 Pa eingesetzt werden. Für die Dimensionierung der Gebläseleistung ist u. a. der Strömungswiderstand des jeweiligen Trocknungsguts zu beachten. Die Gebläse können stationär oder versetzbar eingesetzt werden.

Als Warmlufterzeuger werden u. a. Öl- und Gasbrenner eingesetzt. Sie kommen zur Direktbeheizung mit Abgasbeimischung oder zur indirekten Beheizung mittels Wärmeübertrager zum Einsatz. Auch der Betrieb mit festen Brennstoffen ist möglich.

Brennstoffeigenschaften und Mengenplanung

4

4.1 Elementarzusammensetzung

4.1.1 Hauptelemente

Feste pflanzliche Biomasse besteht im Wesentlichen aus Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H) und Sauerstoff (O). Die Komponente biogener Festbrennstoffe, durch deren Oxidation die freigesetzte Energie weitgehend bestimmt wird, ist der Kohlenstoff. Daneben liefert der Wasserstoff bei der Oxidation ebenfalls Energiemengen und bestimmt somit gemeinsam mit dem Kohlenstoff den Heizwert des trockenen Brennstoffs. Der Sauerstoff unterstützt dagegen lediglich den Oxidationsvorgang.

Mit 47 bis 50 % in der Trockenmasse (TM) haben Holzbrennstoffe den höchsten Kohlenstoffgehalt, während die Mehrzahl der Nicht-Holz-Brennstoffe meist einen C-Gehalt von rund 45 % aufweist. Der Sauerstoffgehalt liegt zwischen 40 und 45 % in der TM und der des Wasserstoffs zwischen 5 und 7 % (Tabelle 4.1). Im Vergleich zu den biogenen Kraftstoffen wie Pflanzenöl liegt der Kohlenstoff- und Wasserstoffgehalt bei den Festbrennstoffen deutlich niedriger (vgl. Kapitel 10.2).

4.1.2 Emissionsrelevante Elemente

Zu den Elementen mit Auswirkung auf den Schadstoffausstoß bei der Verbrennung zählen vor allem der Schwefel-, Stickstoff- und Chlorgehalt sowie der Aschegehalt. Bei diesen Inhaltsstoffen gilt allgemein, dass steigende Gehalte im Brennstoff mit einer Zunahme an Schadstoffen im Abgas verbunden sind.

Die Brennstoffe unterscheiden sich bei den emissionsrelevanten Inhaltsstoffen zum Teil erheblich. Beispielsweise ist der Stickstoffgehalt (N) von Holz mit ca. 0,1 bis 0,2 % und Stroh mit ca. 0,5 % relativ gering, während eiweißreiche Pflanzen deutlich darüber liegen können, vor allem wenn generative Organe

Tabelle 4.1: Gehalt an Hauptelementen in naturbelassenen Biomasse-Festbrennstoffen im Vergleich zu Stein- und Braunkohle (nach /3-19/)

Brennstoffart	C	H	O	N	S	Cl
	in % der Trockenmasse					
Fichtenholz (mit Rinde)	49,8	6,3	43,2	0,13	0,015	0,005
Buchenholz (mit Rinde)	47,9	6,2	45,2	0,22	0,015	0,006
Pappelholz (Kurzumtrieb)	47,5	6,2	44,1	0,42	0,031	0,004
Weidenholz (Kurzumtrieb)	47,1	6,1	44,3	0,54	0,045	0,004
Rinde (von Nadelholz)	51,4	5,7	38,7	0,48	0,085	0,019
Roggenstroh	46,6	6,0	42,1	0,55	0,085	0,40
Weizenstroh	45,6	5,8	42,4	0,48	0,082	0,19
Triticalestroh	43,9	5,9	43,8	0,42	0,056	0,27
Gerstenstroh	47,5	5,8	41,4	0,46	0,089	0,40
Rapsstroh	47,1	5,9	40,0	0,84	0,27	0,47
Weizen-Ganzpflanzen	45,2	6,4	42,9	1,41	0,12	0,09
Triticale-Ganzpflanzen	44,0	6,0	44,6	1,08	0,18	0,14
Weizenkörner	43,6	6,5	44,9	2,28	0,12	0,04
Triticalekörner	43,5	6,4	46,4	1,68	0,11	0,07
Rapskörner	60,5	7,2	23,8	3,94	0,10	
Miscanthus	47,5	6,2	41,7	0,73	0,15	0,22
Landschafts-pflegeheu	45,5	6,1	41,5	1,14	0,16	0,31
Weidelgras	46,1	5,6	38,1	1,34	0,14	1,39
zum Vergleich:						
Steinkohle	72,5	5,6	11,1	1,3	0,94	<0,1
Braunkohle	65,9	4,9	23,0	0,7	0,39	<0,1

(Körner) enthalten sind (Tabelle 4.1). Stickstoff wirkt sich direkt auf die Stickstoffoxid(NO_x)-Bildung aus, da er bei der Verbrennung nahezu vollständig in die Gasphase übergeht und sich deshalb nicht in der Asche wiederfindet.

Der Schwefelgehalt (S) biogener Festbrennstoffe ist im Vergleich zu Kohlebrennstoffen relativ gering. Rapsstroh besitzt mit durchschnittlich ca. 0,3 % in der TM den höchsten Schwefelgehalt, während die meisten Holzbrennstoffe im Bereich von 0,02 bis 0,05 % und Getreidestroh meist unter 0,1 % liegen (Tabelle 4.1). Bei der Verbrennung bestimmt der Schwefelgehalt primär die Schwefeldioxid(SO_2)-Emission. Ein großer Teil des Schwefelgehaltes im Brennstoff (ca. 40 bis 90 %) wird – je nach Abscheidegrad der Entstaubungseinrichtungen – in die Asche eingebunden.

Auch Chlor (Cl) ist ein bedeutender Begleitstoff in Düngemitteln (insbesondere in Kaliumdüngern /4-8/) und kommt daher in Biomassen aus gedüngten Feldkulturen in deutlich höheren Anteilen vor als im Holz, welches in der Regel von ungedüngten Flächen stammt. Holzbrennstoffe zeigen folglich mit ca. 0,005 bis 0,02 % in der TM sehr niedrige Chlorgehalte, während der Gehalt im Getreidestroh mit ca. 0,2 bis 0,5 % (2 000 bis 5 000 mg/kg TM) um ein Vielfaches höher liegt (Tabelle 4.1). Die Gehaltsschwankungen sind auf Grund der hohen Mobilität des Chlorids allerdings sehr hoch, es kann durch Niederschläge während der Bodentrocknung von Stroh oder Gras leicht ausgewaschen werden. Aus verbrennungstechnischer Sicht ist ausgewaschenes „graues“ Stroh gegenüber frischem „gelben“ Stroh zu bevorzugen.

Die Bedeutung des Chlors beruht auf dessen Beteiligung an der Bildung von Chlorwasserstoff (HCl) und Dioxinen/Furanen (PCDD/F) /4-10/, /4-15/. Trotz relativ hoher Chloreinbindungsraten in der Asche von 40 bis 95 % /4-15/ können beispielsweise die HCl-Emissionen bei bestimmten chlorreichen Brennstoffen (z. B. Getreidestroh) problematisch werden. Zusätzlich wirkt Chlor im Zusammenspiel mit anderen Elementen korrosiv.

4.1.3 Spurenelemente (Schwermetalle)

Zu den Spurenelementen zählen alle verbleibenden Elemente, bei denen es sich in der Mehrzahl um Schwermetalle handelt. Sie bestimmen vor allem die Eigenschaften der bei der Verbrennung anfallenden Aschen.

Im Allgemeinen sind Holzbrennstoffe aus dem Wald höher mit Schwermetallen belastet als jährlich erntbare Kulturen. Die Rinde von Nadelhölzern nimmt hierbei eine Spitzenstellung ein.

Die Schwermetallgehalte stellen ein wesentliches Merkmal für die Unterscheidung zwischen naturbelassenen und nicht-naturbelassenen Brennstoffen dar. Einige Schwermetalle werden daher auch als Indikatoren für eine nicht-naturbelassene Brennstoffherkunft verwendet. Beispielsweise lassen sich mit Hilfe von Schnelltestverfahren für Zink, Blei und Chlor in der Asche von Kleinfeuerungsanlagen Anhaltspunkte für eine Verwendung belasteter Brennstoffe ableiten /4-13/. Auch bei Presslingen aus naturbelassenem Holz ist der Nachweis für die Verwendung unbelasteter Rohstoffe dadurch zu erbringen, dass Grenzwerte für bestimmte Schwermetallgehalte und andere Stoffe unterschritten werden müssen. Beispielsweise dürfen Holzbriketts oder -pellets nach DIN 51 731 /4-5/ folgende Schadstoffgehalte in der Trockenmasse nicht überschreiten:

Schwefel (S)	< 0,08 %
Chlor (Cl)	< 0,03 %
Stickstoff (N)	< 0,3 %
Arsen (As)	< 0,8 mg/kg
Cadmium (Cd)	< 0,5 mg/kg
Chrom (Cr)	< 8 mg/kg
Kupfer (Cu)	< 5 mg/kg
Quecksilber (Hg)	< 0,05 mg/kg
Blei (Pb)	< 10 mg/kg
Zink (Zn)	< 100 mg/kg

4.2 Weitere Brennstoffeigenschaften und ihre Bedeutung

4.2.1 Wassergehalt und Brennstoff-Feuchte

Definition. Der Wassergehalt w wird auf die Frischmasse bezogen; er beschreibt damit das in der feuchten Biomasse befindliche Wasser, wobei sich diese feuchte Biomasse aus der trockenen Biomasse (d. h. Trockenmasse) m_B und der darin enthaltenen Wassermasse m_W zusammensetzt (Gleichung (4-1)).

$$w = \frac{m_W}{m_B + m_W} = \frac{u}{1+u} \qquad (4\text{-}1)$$

Die Brennstoff-Feuchte u (zum Teil auch „Feuchtegehalt“ bezeichnet) wird dagegen auf die Trockenmasse bezogen; sie ist folglich definiert als die im Brennstoff gebundene Wassermasse m_W bezogen auf die trockene Biomasse m_B nach Gleichung (4-2). Die Feuchte kann damit in den Wassergehalt umgerechnet bzw. aus ihm berechnet werden. Demnach entspricht

z. B. ein Wassergehalt von 50 % einer Brennstoff-Feuchte von 100 %. Bei den Feuchteangaben sind somit auch Werte von über 100 % möglich.

Bei der „Feuchte“ handelt es sich um einen hauptsächlich in der Forst- und Holzwirtschaft gebräuchlichen Begriff. In der Praxis der Energienutzung wird dagegen hauptsächlich mit dem „Wassergehalt“ gerechnet.

$$u = \frac{m_W}{m_B} = \frac{w}{1-w} \qquad (4\text{-}2)$$

Wassergehaltseinfluss auf den Heizwert. Der Wassergehalt ist die wesentliche Einflussgröße, die den Heizwert biogener Festbrennstoffe bestimmt. Da wasserfreie Biomasse in der Natur praktisch nicht vorkommt, müssen stets mehr oder weniger große Mengen Feuchtigkeit während der Verbrennung verdunsten. Die hierfür benötigte Wärme wird der dabei freigesetzten Energie entnommen und mindert dadurch die Nettoenergieausbeute, wenn – und das ist der Regelfall – keine Rückkondensation des entstandenen Wasserdampfes im Abgas durch eine Abgaskondensationsanlage realisiert wird.

Dieser Einfluss des Wassergehaltes auf den Heizwert lässt sich nach Gleichung (4-3) bestimmen. Dabei ist $H_{u\,(w)}$ der Heizwert des Holzes (in MJ/kg) bei einem bestimmten Wassergehalt w; $H_{u\,(wf)}$ ist der Heizwert der Holztrockenmasse im „wasserfreien“ (trockenen) Zustand, und die Konstante 2,44 ist die Verdampfungswärme des Wassers in MJ/kg, bezogen auf 25 °C.

$$H_{u\,(w)} = \frac{H_{u\,(wf)} \cdot (100 - w) - 2{,}44\ w}{100} \qquad (4\text{-}3)$$

Abb. 4.1 zeigt diesen Zusammenhang. Demnach nimmt beispielsweise der Heizwert von Holz (ca. 18,5 MJ/kg) mit zunehmendem Wassergehalt bzw. ansteigender Brennstoff-Feuchte linear ab; er ist bei rund 88 % Wassergehalt bzw. etwa 730 % „Brennstoff-Feuchte“ gleich null.

In der Praxis wird oft irrtümlich angenommen, dass mit der Trocknung des Brennstoffs eine proportional zum Heizwert steigende Netto-Energiemenge zur Verfügung steht. Tatsächlich jedoch ist der Gewinn an Brennstoffenergie relativ gering, da ja mit der Trocknung nicht nur der Heizwert steigt, sondern auch die Gesamtmasse an Brennstoff sinkt. Dieser Zusammenhang wird auch in Abb. 4.4 (in Kapitel 4.4) anhand eines Kubikmeters Brennstoff verdeutlicht.

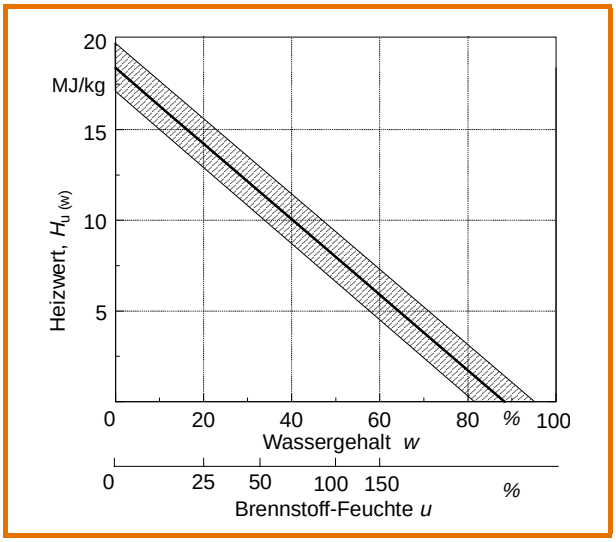


Abb. 4.1: Heizwert von Holz in Abhängigkeit vom Wassergehalt bzw. der Feuchte /4-14/

Typische Wassergehalte von Brennstoffen. Üblicherweise kann bei luftgetrocknetem Holz oder Stroh von Wassergehalten zwischen 12 und 20 % ausgegangen werden; nach Gleichung (4-3) resultiert daraus ein Heizwert zwischen 13 und 16 MJ/kg. Bei waldfrischem Holz, Rinde oder Holz aus Kurzumtriebsplantagen kann der Wassergehalt aber auch bei 50 % und mehr liegen; entsprechend geringer ist dann der Heizwert (Abb. 4.1).

Der Wassergehalt der Festbrennstoffe schwankt – bezogen auf die gesamte Masse – zwischen ca. 10 und 65 %. Waldfrisches Holz liegt je nach Baumart, Alter und Jahreszeit zwischen 45 und 60 %. Im Gleichgewichtszustand schwankt der Wassergehalt von „lufttrockenem“ Holz – je nach Jahreszeit – etwa zwischen 12 und 18 %. Normgerechte Holzpresslinge nach DIN 51 731 /4-5/ haben einen Wassergehalt von maximal 12 % bzw. nach ÖNORM /4-16/ von maximal 10 %.

4.2.2 Heizwert

Definition. Der Heizwert (H_u, früher auch „unterer Heizwert“) beschreibt die Wärmemenge, die bei der vollständigen Oxidation eines Brennstoffs ohne Berücksichtigung der Kondensationswärme (Verdampfungswärme) des im Abgas befindlichen Wasserdampfes freigesetzt wird. Beim Heizwert wird somit unterstellt, dass der bei der Verbrennung freigesetzte Wasserdampf dampfförmig bleibt und dass die Wärmemenge, die bei einer eventuellen Kondensation durch Rauchgasabkühlung frei werden könnte (sogenannte „latente Wärme“: 2,441 Kilojoule je Gramm Wasser) nicht nutzbringend verwendet wird.

Tabelle 4.2: Verbrennungstechnische Kenndaten von naturbelassenen Biomasse-Festbrennstoffen im Vergleich zu Stein- und Braunkohle (nach /3-19/). k.A. keine Angabe

Brennstoff / Biomasseart	Heizwert, $H_{u\,(wf)}$ MJ/kg	Brennwert, $H_{o\,(wf)}$ MJ/kg	Aschegehalt (wf) in %	Erweichungspunkt der Asche in °C
Fichtenholz (mit Rinde)	18,8	20,2	0,6	1 426
Buchenholz (mit Rinde)	18,4	19,7	0,5	k.A.
Pappelholz (Kurzumtrieb)	18,5	19,8	1,8	1 335
Weidenholz (Kurzumtrieb)	18,4	19,7	2,0	1 283
Rinde (Nadelholz)	19,2	20,4	3,8	1 440
Roggenstroh	17,4	18,5	4,8	1 002
Weizenstroh	17,2	18,5	5,7	998
Triticalestroh	17,1	18,3	5,9	911
Gerstenstroh	17,5	18,5	4,8	980
Rapsstroh	17,1	18,1	6,2	1 273
Weizenganzpflanzen	17,1	18,7	4,1	977
Triticaleganzpflanzen	17,0	18,4	4,4	833
Weizenkörner	17,0	18,4	2,7	687
Triticalekörner	16,9	18,2	2,1	730
Rapskörner	26,5	k.A.	4,6	k.A.
Miscanthus	17,6	19,1	3,9	973
Landschaftspflegeheu	17,4	18,9	5,7	1 061
Weidelgras	16,5	18,0	8,8	k.A.
zum Vergleich:				
Steinkohle	29,7	k.A.	8,3	1 250
Braunkohle	20,6	k.A.	5,1	1 050

Der Wasserdampf im Abgas der Verbrennung stammt aus der chemischen Oxidation des gebundenen Wasserstoffs mit Sauerstoff und vor allem aus der Verdunstung des freien Wassers im (feuchten) Brennstoff. Da für diese Verdunstung eine ebenso große Wärmemenge benötigt wird wie durch Kondensation frei werden würde, sinkt der Heizwert mit zunehmendem Wassergehalt entsprechend (vgl. Kapitel 4.2.1).

Heizwert von Biomasse. Der Heizwert eines biogenen Festbrennstoffs wird wesentlich stärker vom Wassergehalt beeinflusst als von der Art der Biomasse (vgl. Abb. 4.1). Deshalb werden die Heizwerte unterschiedlicher Brennstoffarten stets im absolut trockenen Zustand angegeben und verglichen.

Bei biogenen Festbrennstoffen liegt der Heizwert bezogen auf die wasserfreie Masse ($H_{u\,(wf)}$) in einer engen Bandbreite zwischen 16,5 und 19,0 MJ/kg (Tabelle 4.2). In der Praxis gilt die Faustregel, dass ca. 2,5 kg lufttrockenes Holz etwa einem Liter Heizöl (≈ 10 kWh bzw. ≈ 36 MJ) entsprechen (vgl. Abb. 4.3). Nadelholz liegt beim Heizwert ca. 2 % höher als Laubholz /4-8/. Dieser Unterschied – wie auch der um weitere 2 % höhere Heizwert der Nadelholzrinde – ist auf den höheren Ligningehalt der Nadelhölzer bzw. zum Teil auch auf den erhöhten Gehalt an Holzextraktstoffen (z. B. Harze, Fette) zurückzuführen. Deren Teilheizwert ist mit ca. 28,8 bzw. 35,9 MJ/kg deutlich höher als für Cellulose (ca. 17,3 MJ/kg) oder Polyosen (ca. 16,2 MJ/kg) /4-11/.

Holzbrennstoffe zeigen insgesamt einen durchschnittlich ca. 9 % höheren Heizwert als Halmgüter; bei denen er zwischen 16,5 und 17,5 MJ/kg schwankt (bezogen auf Trockenmasse). Nennenswerte Unterschiede zwischen Getreidestroh und -körnern sind dabei nicht erkennbar; das gilt auch für Heu und Gräser. Ölhaltige Brennstoffe (z. B. Rapskörner, Rapspresskuchen) besitzen je nach Ölgehalt, dessen Heizwert bei ca. 36 MJ/kg liegt, einen insgesamt erhöhten Heizwert.

4.2.3 Brennwert

Definition. Im Unterschied zum Heizwert ist der Brennwert (H_o, früher auch „oberer Heizwert“) definiert als die bei der vollständigen Oxidation eines Brennstoffs freigesetzte Wärmemenge, die verfügbar wird, wenn auch die Kondensationswärme des bei der Verbrennung gebildeten Wasserdampfs nutzbar gemacht wird. Dazu müssen die Abgase so tief abgekühlt werden, dass der gebildete Wasserdampf kondensieren kann, um auch die Kondensationswärme freizusetzen. Das heißt, dass das Wärmenutzungssystem, das den Brennwert des Brennstoffs ausnutzen soll, auf sehr niedrige Temperaturen ausgelegt sein muss, damit im Wärmetauscher eine Absenkung der Abgastemperaturen unter den Taupunkt überhaupt gelingt. Wenn sowohl der Wärmetauscher als auch die Wärmenutzung (z. B. bei Niedertemperaturheizung) hierauf eingerichtet sind spricht man vom „Brennwertkessel“ oder von „Brennwerttechnik“). Derartige technische Lösungen sind bei kleineren Biomassefeuerungen jedoch noch selten; daher wird der Energieinhalt des Brennstoffs im Regelfall mit dem Heizwert angegeben.

Brennwert von Biomasse. Bei biogenen Festbrennstoffen liegt der Brennwert durchschnittlich um

ca. 6 % (Rinde), 7 % (Holz) bzw. 7,5 % (Halmgut) über dem Heizwert (vgl. Tabelle 4.2). Das gilt jedoch nur für Festbrennstoffe im absolut trockenen Zustand (d. h. bezogen auf Trockenmasse). Bei feuchter Biomasse vergrößert sich dieser relative Abstand, so dass der durch Rekondensation des entstehenden Wasserdampfes erzielbare Energiegewinn steigt.

4.2.4 Aschegehalt

Von allen biogenen Festbrennstoffen besitzt Holz (einschließlich Rinde) mit ca. 0,5 % der TM den geringsten Aschegehalt. Größere Überschreitungen dieses Wertes sind meist auf Sekundärverunreinigungen (z. B. anhaftende Erde) zurückzuführen. Holzpresslinge nach DIN 51 731 dürfen nur einen Aschegehalt von maximal 1,5 % in der Trockenmasse aufweisen /4-5/, bei Holzpellets nach ÖNORM M7135 /3-40/ sind sogar nur maximal 0,8 % Aschegehalt zulässig. Bei Fichtenrinde liegt der Aschegehalt dagegen zwischen 2,5 und 5 % (vgl. Tabelle 4.2). Noch höher ist er bei den meisten Halmgutbrennstoffen.

Der Aschegehalt hat sowohl Auswirkungen auf die Umweltbelastungen (d. h. Schadstoffemissionen) als auch auf die technische Auslegung einer Feuerungsanlage. Außerdem erhöhen sich die Aufwendungen für die Verwertung bzw. Entsorgung der anfallenden Verbrennungsrückstände.

In der Asche finden sich viele der in Kapitel 4.1 genannten Elemente wieder. Sie besteht vorwiegend aus Kalzium (Ca), Magnesium (Mg), Kalium (K), Phosphor (P) und Natrium (Na). Unter bestimmten Bedingungen kann sie daher auch als Dünger eingesetzt werden (Kapitel 7.3).

4.2.5 Ascheerweichungsverhalten

Bei der Verbrennung treten im Glutbett physikalische Veränderungen der Asche auf. Je nach Temperaturniveau kommt es zum Verkleben („Versintern“) bis zum völligen Aufschmelzen der Aschepartikel. Brennstoffe mit niedrigen Ascheerweichungstemperaturen erhöhen somit das Risiko, dass es zu Anbackungen und Ablagerungen im Feuerraum, am Rost und an den Wärmeübertragerflächen kommt. Derartige Anbackungen können u. a. zu Störungen, Betriebsunterbrechungen und Veränderungen bei der Verbrennungsluftzufuhr führen, und sie begünstigen die Hochtemperaturkorrosion. Diese technischen Nachteile müssen bei der Auslegung oder Konstruktion und Feuerungsanlage berücksichtigt werden (Kapitel 6.2.1). Sie können durch aufwändige Zusatzeinrichtungen wie z. B. wassergekühlte Rostsysteme oder Brennmulden, Abgasrückführung, Aschebrecher, Brennstoffverwirbelung oder durch Brennstoffadditivierung beherrscht werden.

Das Erweichungsverhalten von Biomasseaschen hängt von der Aschezusammensetzung und somit vor allem vom Brennstoff ab; es zählt deshalb zu den brennstoffspezifischen Merkmalen. Als Messgrößen gelten die Temperaturen des Sinterbeginns, Erweichungspunktes, Halbkugelpunktes und Fließpunktes der Asche (nach DIN 51 730 /4-4/).

Zur Orientierung sind in Tabelle 4.2 nur die Temperaturen des Asche-Erweichungspunktes dargestellt. Während Holz und Rinde mit ca. 1 300 bis 1 400 °C aus technischer Sicht für die meisten Einsatzfälle unkritisch sind, liegen die entsprechenden Temperaturen bei halmgutartigen Brennstoffen fast durchweg unter 1 200 °C. Dadurch kann es bei der Verbrennung zu den beschriebenen Nachteilen kommen. Beim Getreidestroh liegt beispielsweise der häufigste Wert zwischen 900 und 950 °C. Besonders kritisch sind Getreidekörner mit einem Asche-Erweichungspunkt von nur ca. 700 °C.

4.3 Physikalisch-mechanische Eigenschaften

Die physikalisch-mechanischen Kenngrößen kennzeichnen die Brennstoffmerkmale, die wesentlich durch die Ernte- und Aufbereitungstechnik bestimmt werden. Sie lassen sich durch Parameter wie Abmessungen, Oberflächenbeschaffenheit und Geometrie („Stückigkeit“), Größenverteilung der Brennstoffteilchen, Feinanteil, Brückenbildungsneigung, Schütt- und Rohdichte und Abriebfestigkeit beschreiben.

Stückigkeit (Abmessungen, Geometrie). Festbrennstoffe werden auch durch deren Form beschrieben. Diese wird bestimmt durch die Abmessungen (d. h. Länge, Höhe, Breite) bzw. das Volumen und die Form.

Bei handbeschickten Feuerungsanlagen für Scheitholz (zum Teil auch für Briketts oder Ballen) werden z. B. spezifische Anforderungen an die maximalen Abmessungen des Brennstoffs gestellt. Je nach Tiefe des Feuerraums haben solche Scheite in der Endnutzungsform eine Länge von maximal einem Meter (für „Meterholzkessel“). Meist kommt aber 1- bis 3-mal geschnittenes und gespaltenes Meterholz mit Stücken von entsprechend 50, 33 bzw. 25 cm Länge zum Einsatz, wobei 33 cm Stücke eindeutig dominieren /4-7/. Bei normgerechten Briketts und Pellets

Tabelle 4.3: Normierte Größenklassen für Presslinge (Pellets und Briketts) aus naturbelassenem Holz nach DIN 51 731 /4-5/

Bezeichnung, Größengruppe	Länge	Durchmesser bzw. Breite oder Höhe
HP 1	> 30 cm	> 10 cm
HP 2	15 - 30 cm	6 - 10 cm
HP 3	10 - 16 cm	3 - 7 cm
HP 4	< 10 cm	1 - 4 cm
HP 5	< 5 cm	0,4 - 1 cm

sind die zulässigen Abmessungen genau vorgegeben (Tabelle 4.3).

Größenverteilung und Feinanteil. Die Fließ- und Transporteigenschaften von Schüttgütern werden – außer durch Partikelform und -größe – auch durch die Partikelgrößenverteilung sowie den Feinanteil (z. B. Abrieb von Pellets) bestimmt.

Beispielsweise reicht für die zuverlässige Beurteilung einer Brennstoffcharge von Fein-, Mittel- und Grobhackgut (Nennlänge ca. 30, 50 bzw. 100 mm) die Feststellung einer mittleren Teilchenlänge nicht aus. Vielmehr müssen auch die Anteile einzelner Größenklassen und vor allem die Maximallänge der Teilchen bekannt sein. Deshalb werden biogene Festbrennstoffe zunehmend nach der Größenverteilung der Teilchen klassifiziert. Ein solches Klassifizierungssystem aus Österreich zeigt Tabelle 4.4. Derzeit wird an einer europaweit einheitlichen Anforderungsnorm einschließlich eines vergleichbaren Klassifizierungssystems für biogene Festbrennstoffe gearbeitet.

Die Größenverteilung der Brennstoffteilchen hat vielfältige technische Auswirkungen. Besonders stark betroffen von einer ungleichmäßigen Größenverteilung sind die mechanischen Entnahme-, Förder- und Beschickungssysteme von Konversionsanlagen. Zu große oder zu lange Teilchen führen zu Blockaden und auch Schäden an den Förderaggregaten oder senken die Durchsatzleistung. Auch die Riesel- bzw. Fließfähigkeit werden durch die Größenverteilung bestimmt.

Brückenbildungsneigung (Rieselfähigkeit). Bei der Entnahme aus Silos oder Tagesvorratsbehältern kann es zur Bildung von Hohlräumen (Brücken) kommen, die dazu führen, dass der Brennstoff nicht mehr in die darunter liegenden Förderaggregate nachrutscht. Die Brückenbildungsneigung biogener Festbrennstoffe nimmt mit dem Wassergehalt, der Schütthöhe und vor allem mit dem Anteil verzweigter oder überlanger Teilchen zu. Gleichmäßige Partikelgrößen und glatte Oberflächen (z. B. Pellets, rindenfreies Hackgut) vermindern dagegen das Brückenbildungsrisiko /4-12/. Eine nachträgliche Sortierung zum Erreichen gleichmäßigerer Materialeigenschaften führt somit zu einer deutlichen Verbesserung bei diesem Parameter.

Lagerdichte (Schütt- und Stapeldichte). Insbesondere das erforderliche Lager- und Transportvolumen der Brennstoffe wird von der Schüttdichte bzw. bei nicht-schüttfähigen Brennstoffen von der Stapeldichte bestimmt. Die Schüttdichte ist dabei definiert als der Quotient aus der Masse des in einen Behälter eingefüllten Brennstoffs und dem Volumen dieses Behälters /4-2/. Hohlräume zwischen den Brennstoffteilchen werden also vom Volumen nicht abgezogen; das gilt auch bei der Stapeldichte. Übliche Werte für die bei der Raumbedarfsplanung verwendeten Lagerdichten gibt Tabelle 4.5.

Zum Vergleich von Brennstoffmassen müssen die Dichteangaben gelegentlich auf den jeweiligen Wassergehalt bzw. auf die Trockenmasse umgerechnet werden. Aus praktischen Gründen wird dabei die Quellung und Schrumpfung, die unterhalb des Fasersättigungspunktes eintritt (siehe „Rohdichte“), nicht berücksichtigt, so dass die Frischmassedichte (ρ_F) bzw. die Trockenmassedichte (ρ_{TM}) nach Gleichung

Tabelle 4.4: Anforderungen an die Größenverteilung nach der österreichischen Norm für Holzhackgut (ÖNORM M7133 /4-17/)

	Zulässige Massenanteile und jeweilige Bandbreite für Teilchengröße (nach Siebanalyse)				Zulässige Maximalwerte	
	max. 20 %	60 - 100 %	max. 20 %	max. 4 %	Querschnitt	Länge
G 30	>16 mm	16-2,8 mm	< 2,8 mm	< 1 mm	3 cm^2	8,5 cm
G 50	>31,5 mm	31,5-5,6 mm	< 5,6 mm	< 1 mm	5 cm^2	12 cm
G 100	>63 mm	63-11,2 mm	< 11,2 mm	< 1 mm	10 cm^2	25 cm

(4-4) und (4-5) errechnet werden können, wobei F_N der Wassergehalt bezogen auf die Gesamtmasse ist (angegeben als Dezimalbruch).

$$\rho_F = \frac{\rho_{TM}}{1 - F_N} \qquad (4\text{-}4)$$

$$\rho_{TM} = \rho_F \cdot (1 - F_N) \qquad (4\text{-}5)$$

Tabelle 4.5: Typische Schütt- und Stapeldichten biogener Festbrennstoffe bei 15 % Wassergehalt /3-19/

		Schütt-/Stapeldichte
Holzbrennstoffe:		in kg/m³:
Scheitholz (gestapelt)	Buche Fichte	460 310
Hackgut	Weichholz Hartholz	195 260
Rinde	Nadelholz Laubholz	205 320
Sägemehl		170
Hobelspäne		90
Pellets		650
landwirtschaftliche Brennstoffe:		
Quaderballen	Stroh, Miscanthus Heu Getreideganzpflanzen	140 160 190
Häckselgut	Stroh, Miscanthus Getreideganzpflanzen	65 70 150
Getreidekörner		760

Rohdichte (Einzeldichte). Die Roh- oder Einzeldichte eines Brennstoffs beschreibt die eigentliche Materialdichte (d. h. ohne Berücksichtigung der Hohlräume zwischen den Teilchen). Sie beeinflusst die Schütt- bzw. Stapeldichte und einige feuerungstechnisch relevante Eigenschaften (z. B. spezifische Wärmeleitfähigkeit, Entgasungsrate) sowie die Eigenschaften bei der pneumatischen Förderung und Beschickung.

Tabelle 4.6 zeigt die Rohdichten verschiedener einheimischer Holzarten im absolut trockenen Zustand. Bei Aufsättigung mit Wasser bis zum Fasersättigungspunkt (ca. 19 bis 25 % Wassergehalt) erhöht sich das Volumen um das sogenannte Schwindmaß; dies hat auch entsprechende Auswirkungen auf die Dichte des feuchten Brennstoffs. Diese Volumenvergrößerung beträgt bei Buche bzw. Eiche 17,9 bzw. 12,2 % und bei Fichte bzw. Kiefer ca. 11,9 bzw. 12,1 % /4-1/.

Die Rohdichte kann nur bei der Herstellung hochverdichteter Presslinge (d. h. Pellets, Briketts) beeinflusst werden. Daher wird sie vereinfachend auch als Merkmal für die Güte eines derartigen Herstellungsprozesses verwendet. Eine hohe Rohdichte deutet auf eine große Härte des Presslings hin; hier ist dann mit geringen Abriebeffekten und Feinanteilen zu rechnen. Deshalb müssen beispielsweise normgerechte Holzpresslinge nach DIN 51 731 eine Rohdichte von 1,0 bis 1,4 g/cm³ besitzen, wobei der Wassergehalt von maximal 12 % zur Brennstoffmasse zählt /4-5/.

Tabelle 4.6: Rohdichte (einschließlich Volumenschwund) von absolut trockenem Holz („Darrdichte") (nach /4-16/)

Weichhölzer (bis 0,55 g/cm³)		Harthölzer (über 0,55 g/cm³)	
Fichte	0,41 g/cm³	Eiche	0,67 g/cm³
Tanne	0,41 g/cm³	Bergahorn	0,59 g/cm³
Kiefer	0,51 g/cm³	Esche	0,67 g/cm³
Douglasie	0,47 g/cm³	Buche	0,68 g/cm³
Lärche	0,55 g/cm³	Birke	0,64 g/cm³
Linde	0,52 g/cm³	Hain-/Weißbuche	0,75 g/cm³
Pappel	0,41 g/cm³	Hasel	0,56 g/cm³
Weide	0,52 g/cm³	Ulme	0,64 g/cm³

Die Unterschiede zwischen Rohdichte und Schütt- bzw. Stapeldichte führen dazu, dass ein in Volumeneinheiten angegebenes Brennstoffaufkommen häufig in die eine oder andere Bezugsform umgerechnet werden muss. Beispielsweise werden Holzmengen im Rohzustand meist in Festmetern angegeben (d. h. ohne Berücksichtigung von Hohlräumen); bereitgestellte Brennstoffe werden hingegen in Raum- bzw. Schüttraummeter bemessen. Diese Maße lassen sich nach Abb. 4.2 ineinander umrechnen. Im Einzelfall können die Werte jedoch stark abweichen.

4.4 Brennstoffmengenrechnung (Umrechnungszahlen)

Aus den in den vorangegangenen Kapiteln dargestellten Brennstoffdaten lassen sich nützliche Kennzahlen für die Planung des Brennstoffbedarfs und für die Abschätzung vorhandener Brennstoffvorräte ableiten.

Zur Bestimmung der Energiemenge, die in einer bestimmten Brennstoffcharge vorliegt, muss zunächst ihr Gewicht bekannt sein oder es muss geschätzt werden. Scheitholz wird aber üblicherweise nach Volumen gehandelt, wobei als Bezugsgröße in der Regel der Rauminhalt von einem Kubikmeter gestapeltem Holz verwendet wird („Raummeter" oder „Ster").

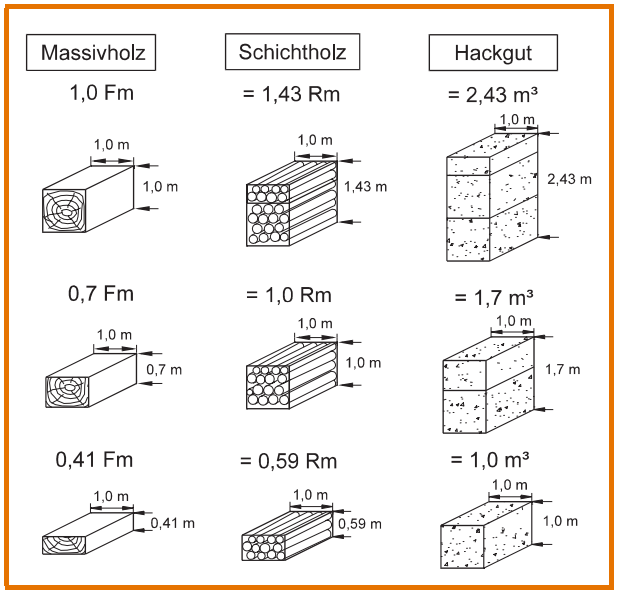


Abb. 4.2: Umrechnungsfaktoren für Festmeter (Fm), Raummeter (Rm) und Schüttraummeter (m³) (nach /4-1/)

Tabelle 4.7: Umrechnung von Raummeter (Rm) auf Festmeter (Fm) Holz; typische Werte für verschiedene Sortimente /4-16/

	ein Rm enthält	Schwankungsbereich
Rollen und Scheiter (1 m, geschichtet)	0,75 Fm	0,70 bis 0,80
Prügel, krumme Rollen und Scheiter (1 m, geschichtet)	0,65 Fm	0,60 bis 0,70
Knüppel, Äste, Reisig (geschichtet)	0,35 Fm	0,20 bis 0,50
Waldhackgut (geschüttet)	0,40 Fm	0,35 bis 0,45
Schwarten (lose, geschichtet)	0,60 Fm	0,50 bis 0,70
Schwarten (gebündelt)	0,65 Fm	0,55 bis 0,75
Spreißel (lose)	0,55 Fm	0,45 bis 0,65
Spreißel (gebündelt)	0,60 Fm	0,50 bis 0,70
Sägehackgut (geschüttet)	0,35 Fm	0,30 bis 0,40
Sägespäne (geschüttet)	0,33 Fm	0,31 bis 0,35
Rinde (geschüttet)	0,30 Fm[a]	0,20 bis 0,40

a. stark von der zugehörigen Holzart abhängig
Fm Festmeter; Rm Raummeter

Nachfolgend wird die Umrechnung in Masseeinheiten und energetische Brennstoffmenge (MJ oder kWh) vorgestellt.

Bei Mengenabschätzungen kann überschlägig davon ausgegangen werden, dass ein Kubikmeter gestapeltes Holz etwa 0,7 Festmetern (Fm) entspricht (vgl. Abb. 4.2). Das gilt zumindest für Meterholz; bei anderen Aufbereitungsformen gelten die in Tabelle 4.7 angegebenen Umrechnungszahlen. Vom Festmeter lässt sich wiederum auf die vorliegende Holzmasse schließen. Dazu muss die Holzdichte bekannt sein. Da Holz in der Natur nie im absolut wasserfreien Zustand vorkommt, sollte es sich bei der verwendeten Dichte nicht um die „Darrdichte“ (vgl. Kapitel 4.3), sondern um die Holzdichte ohne Schrumpfungseffekte handeln. Beispielsweise wiegt dann ein Festmeter trockenes Buchenholz 558 kg (bezogen auf die wasserfreie Masse ohne Schwindung), bei Fichte liegt dieser Wert dagegen nur bei 361 kg. Aus diesen Dichteangaben kann nun nach der in Kapitel 4.3 angegebenen Gleichung (4-4) die Holzdichte (Festmetergewichte) bei unterschiedlichen Wassergehalten ausgerechnet werden. Für die vier verschiedenen Holzarten Buche, Eiche, Fichte und Kiefer ist eine solche Berechnung für verschiedene Wassergehalte in Tabelle 4.8 durchgeführt worden.

Aus den so berechneten Festmetergewichten (Frischmassedichten) lassen sich nun mit Hilfe der Faustzahlen in Abb. 4.2 die Raumgewichte für geschichtetes Meterholz oder für Hackschnitzel-Schüttkubikmeter berechnen (geteilt durch 1,43 bzw. geteilt durch 2,43). Vereinfachend lassen sich entsprechende Planungszahlen aber auch aus Tabelle 4.8 ablesen.

Brennstoffbedarfsrechnung. In der Regel ist der Wärmebedarf oder die zu ersetzende Menge an konventionellen Energieträgern (Heizöl, Gas, Strom) an einem vorgesehenen Einsatzort bekannt. Mit diesen Angaben und den vorgenannten Umrechnungszahlen lässt sich nun die insgesamt – zum Beispiel für eine Heizperiode – benötigte Biomassemenge ermitteln. Hierzu wird zunächst der Energieinhalt in einem Kubikmeter oder in einem Raummeter der jeweiligen Brennstoffart festgestellt. Er ergibt sich aus der zuvor bestimmten Masse (einschließlich Wassergehalt) multipliziert mit dem Heizwert der jeweiligen Biomasseart.

Da der Heizwert wiederum stark vom Wassergehalt abhängig ist, muss auch hierzu eine gesonderte Berechnung erfolgen. Dazu wird der Heizwert der absolut trockenen Masse (aus Tabelle 4.2) in den Heizwert der Frischmasse (inkl. Wasser) gemäß Gleichung (4-3) umgerechnet. Die Masse eines Raummeters, eines Kubikmeters oder einer Tonne Brennstoff (in kg) wird nun multipliziert mit dem ermittelten Heizwert des feuchten Brennstoffs (in MJ/kg) und ergibt so die Brennstoffmenge in Megajoule. Diese Brennstoffmenge lässt sich nun leicht in kWh oder Liter Heizöl-

Tabelle 4.8: Raumgewichte verschiedener Holzarten und Aufbereitungsformen (Festmeter, Scheitholz-Raummeter, Hackschnitzel-Schüttkubikmeter) in Abhängigkeit vom Wassergehalt

Wassergehalt w (%)	Buche[a]			Eiche[a]			Fichte[a]			Kiefer[a]		
	Fm	SH (Rm)	HS (m³)	Fm	SH (Rm)	HS (m³)	Fm	SH (Rm)	HS (m³)	Fm	SH (Rm)	HS (m³)
	Raumgewichte[b] in kg											
0	558	390	230	588	411	242	361	253	149	448	313	184
10	620	434	255	654	457	269	401	281	165	498	348	205
15	657	459	270	692	484	285	425	297	175	527	369	217
20	698	488	287	735	514	303	452	316	186	560	392	231
30	798	558	328	840	588	346	516	361	212	640	448	264
40	930	651	383	980	686	403	602	421	248	747	522	307
50	1117	781	459	1177	823	484	722	505	297	897	627	369

a. Fm Festmeter, SH Scheitholz (Meterholz, geschichtet), HS Hackschnitzel, Rm Raummeter
b. ohne Berücksichtigung der Tatsache, dass Holz bei der Trocknung um das Schwindmaß schrumpfen kann. Die hier gewählten trockenen Holzdichten (Festmetermasse bei w = 0 %) ergeben sich aus den Rohdichten der Tabelle 4.6 korrigiert um das Schwindmaß (Buche 17,9 %, Eiche 12,2 %, Fichte 11,9 %, Kiefer 12,1 %)

äquivalent umrechnen (Abb. 4.3), und zwar gilt hier:

1 l Heizöl = 10 kWh = 36 MJ

Die Brennstoffmenge in MJ wird somit durch 36 geteilt, um zur Energiemenge in Litern Heizöläquivalent zu gelangen. Um Kilowattstunden zu erhalten, teilt man durch 3,6. Auf diese Weise errechnen sich auch die Zahlenbeispiele, die für verschiedene Brennstoffe in Tabelle 4.9 zur Vereinfachung zusammengestellt wurden. So entspricht beispielsweise ein Raummeter lufttrockenes geschichtetes Fichtenholz der Energiemenge von 128 l Heizöl, während ein Kubikmeter Holzpellets etwa 283 l Heizöl entspricht.

Die insgesamt benötigte Brennstoffmenge ergibt sich demnach aus dem Gesamtbedarf (in kWh bzw. Litern Heizöl) dividiert durch den Energiegehalt einer Massen- oder Volumeneinheit des jeweiligen Biomassebrennstoffs. Wird beispielsweise eine Heizölmenge von 3000 l durch lufttrockenes Fichtenscheitholz ersetzt, so sind hierfür mindestens 23,4 Raummeter

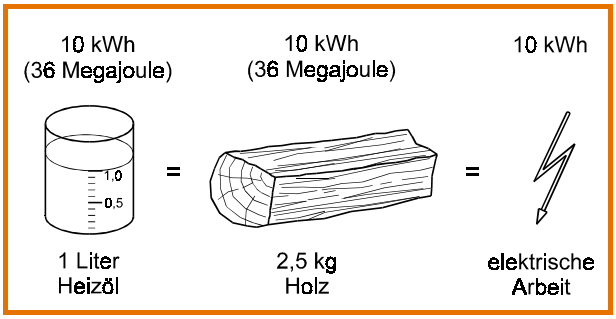


Abb. 4.3: Faustzahlen für den Energiegehalt von trockenem Holz

erforderlich. Auf Grund der Wirkungsgradunterschiede bei der Verbrennung müssen jedoch in der Regel noch leichte Zuschläge von ca. 10 % hinzuaddiert werden.

Sollen die Beschaffungskosten je Liter Heizöläquivalent ausgerechnet werden, ist ähnlich vorzugehen. Wenn beispielsweise sommertrockenes Fichtenscheitholz mit 30 % Wassergehalt für 30 € pro Raummeter (Rm) frei Haus angeliefert werden soll (vgl. Holzpreise in Kapitel 9.1), so entspricht das einem Heizöläquivalent von 124 l/Rm und einem Heizölpreis von 0,24 €/l. Da das Holz aber mit 30 % Wassergehalt noch nicht verbrannt werden kann, muss es weiter gelagert werden, wobei es auf ca. 15 % Wassergehalt abtrocknet. Dabei erhöht sich der Energiegehalt aber nur unwesentlich von 124 auf 128 l Heizöl pro Rm (die Trockenmasse bleibt ja gleich), so dass auch der Heizöläquivalentpreis mit ca. 0,235 €/l nahezu konstant bleibt.

Der Einfluss der Trocknung auf die Brennstoffmenge ist somit vergleichsweise gering, er lässt sich anhand des in Abb. 4.4 dargestellten Zusammenhangs zwischen Energiegehalt und Wassergehalt in einem Raummeter Scheitholz ablesen. In der Praxis wird der Wassergehaltseinfluss häufig überschätzt, da gelegentlich von einem proportionalen Verlauf wie beim massebezogenen Heizwert ausgegangen wird (vgl. hierzu Abb. 4.1 in Kapitel 4.2.2.). Generell ist somit festzustellen, dass die Trocknung von Scheitholzbrennstoffen nur bei sehr feuchten Brennstoffen mit einer nennenswerten Heizwertsteigerung verbunden ist. Im unteren Wassergehaltsbereich dient sie dage-

Tabelle 4.9: Planungszahlen zur Beurteilung des Energiegehaltes einer Brennstoffmenge

Brennstoff	Menge/ Einheit	Wasser-gehalt w (%)	Masse (inkl. Wasser) (kg)	Heizwert (bei w) (MJ/kg)	Brennstoffmenge		
					in MJ	in kWh	in Heizöl-äquivalent (Liter)
Scheitholz:							
Buche, lufttrocken	1 Rm	15	459	15,3	7 012	1 948	195
Buche, sommertrocken	1 Rm	30	557	12,1	6 772	1 881	188
Fichte, lufttrocken	1 Rm	15	297	15,5	4 612	1 281	128
Fichte, sommertrocken	1 Rm	30	361	12,4	4 457	1 238	124
Hackschnitzel:							
Buche, trocken	m³	15	271	15,3	4 113	1 148	115
Buche, beschränkt lagerfähig	m³	30	329	12,1	3 991	1 109	111
Fichte, trocken	m³	15	175	15,5	2 722	756	76
Fichte, beschränkt lagerfähig	m³	30	237	12,4	2 630	731	73
Pellets							
Holzpellets, nach Volumen	m³	8	600	17,0	10 205	2 835	283
Holzpellets, nach Gewicht	1 t	8	1 000	17,0	17 009	4 725	472
Brennstoffe nach Gewicht:							
Buche, lufttrocken	1 t	15	1 000	15,3	15 274	4 243	424
Buche, sommertrocken	1 t	30	1 000	12,1	12 148	3 374	337
Fichte, lufttrocken	1 t	15	1 000	15,5	15 529	4 314	431
Fichte, sommertrocken	1 t	30	1 000	12,4	12 358	3 433	343
Halmgut (z. B. Stroh)	1 t	15	1 000	14,5	14 509	4 030	403

gen hauptsächlich der Qualitätsverbesserung und der Verlustminimierung. Gleichwohl sind Kleinfeuerungen aber aus technischen Gründen und wegen der Emissionsvermeidung auf trockene Brennstoffe angewiesen.

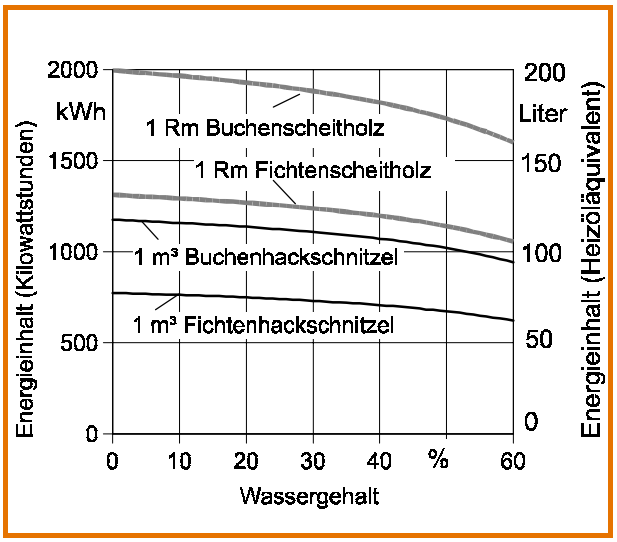


Abb. 4.4: Energieinhalt in einem Raummeter (Rm) Scheitholz bzw. in einem Kubikmeter Holzhackschnitzel bei unterschiedlichem Wassergehalt

5 Grundlegendes zur Feststoff-Verbrennung

5.1 Begriffsdefinitionen

Zum Verständnis der Terminologie und der Zusammenhänge ist es erforderlich, nachfolgend zunächst die wichtigsten Begriffe zu erläutern, bevor die eigentlichen Vorgänge der Verbrennung und die Besonderheiten von Anlagen für biogene Festbrennstoffe dargestellt werden. Auf die Definition des Heizwerts, Brennwerts, Wasser- und Feuchtegehalts kann hier verzichtet werden, da diese Begriffe bereits in Kapitel 4 (Brennstoffeigenschaften) ausführlich erläutert wurden.

Flüchtige Bestandteile. Unter flüchtigen Bestandteilen werden Zersetzungsprodukte der organischen Substanz verstanden. Sie entweichen, wenn biogene Festbrennstoffe erhitzt werden. Der Gehalt an flüchtigen Bestandteilen – zumeist brennbare Gase – wird unter definierten Bedingungen (ca. 1 g Probe, 7 min, Luftabschluss, Temperatur von 900 °C) ermittelt und erlaubt Aussagen über die Zündfreudigkeit in einer Feuerungsanlage /5-1/. Umgekehrt proportional zu dem Gehalt an flüchtigen Bestandteilen ist der Anteil des Kohlenstoffs (Holzkohle), der nach der Erhitzung zurückbleibt.

Der Anteil der flüchtigen Bestandteile am gesamten Brennstoff liegt bei Lignocellulosebrennstoffen meist bei 74 bis 83 % der TM. Holzbrennstoffe markieren mit durchschnittlich 82 % das obere Ende dieser Bandbreite; Getreidestroh und Wiesenheu liegen mit 76 bzw. 74 % dagegen im unteren Bereich. Im Vergleich dazu weisen Kohlen-Brennstoffe mit 6 bis 45 % (verschiedene Steinkohlen) bzw. 45 bis 63 % (Hart- bzw. Weichbraunkohlen) deutlich niedrigere Werte auf /3-19/.

Durch den hohen Gehalt an flüchtigen Bestandteilen eignen sich biogene Festbrennstoffe auch für die Vergasung, d. h. für die Erzeugung eines gasförmigen Brennstoffs für die spätere energetische Nutzung.

Verbrennungswasser und Taupunkt. Das bei der Oxidation eines wasserstoffhaltigen Brennstoffs chemisch gebildete Wasser wird als Verbrennungswasser bezeichnet. Zudem wird bei feuchten Brennstoffen Wasser mit dem Brennstoff eingetragen, in der Feuerung verdampft und als Wasserdampf mit dem Abgas ausgetragen.

Der aus diesen beiden Quellen resultierende Wassergehalt im Abgas bestimmt den Taupunkt der Abgase. Beispielsweise beträgt der Taupunkt bei einem Luftüberschuss von 1,5 für trockenes Holz 45 °C und für nasses Holz 62 °C /5-8/. Bei Unterschreitung des Taupunktes fällt Kondensat an, welches in den meisten Fällen unerwünscht ist, da es zu Korrosion im Kamin und ggf. weiteren Anlagenteilen führen kann und außerdem entsorgt werden muss. In den meisten Anwendungsfällen darf deshalb eine bestimmte Abgastemperatur – abhängig von Brennstoff, Wassergehalt und Luftüberschuss – nicht unterschritten werden.

Außer bei Feuerungen mit Wärmerückgewinnung durch Abgaskondensation stellt die Verdampfungswärme des Wassers einen Energieverlust dar, der besonders bei nassen Brennstoffen die Gesamtenergiebilanz erheblich verschlechtert. Da aber der Feuerungswirkungsgrad meist auf den Heizwert und nicht auf den Brennwert (vgl. Kapitel 4.2) bezogen wird, spiegelt sich der Unterschied zwischen trockenen und nassen Brennstoffen im Wirkungsgrad kaum wider.

Luftüberschusszahl (Luftüberschuss). Um eine vollständige Oxidation der im Brennstoff enthaltenen oxidierbaren Verbindungen sicherzustellen, wird dem Verbrennungsprozess in der Regel Verbrennungsluft im Überschuss zugeführt; d. h. der Reaktion wird mehr Sauerstoff zur Verfügung gestellt, als zur stöchiometrisch vollständigen Oxidation aller im Brennstoff befindlichen Komponenten notwendig wäre. Der Grad des Luftüberschusses wird mit der

Luftüberschusszahl Lambda (λ) beschrieben. Sie ist nach Gleichung (5-1) definiert als das Verhältnis zwischen der innerhalb eines bestimmten Zeitraumes einem Oxidationsvorgang insgesamt zugeführten Luftmenge $m_{Luft,ges}$ zu der für die vollständige Oxidation minimal benötigten Luftmenge $m_{Luft,min}$.

$$\lambda = \frac{m_{Luft,ges}}{m_{Luft,min}} \qquad (5\text{-}1)$$

Für eine vollständige Oxidation muss somit die Luftüberschusszahl mindestens eins betragen (ohne Luftüberschuss). Tatsächlich liegt sie beispielsweise bei Holzfeuerungen zwischen 1,5 und 2,5; d. h. die Verbrennung erfolgt bei Luftüberschuss /4-14/.

Es gibt aber auch thermochemische Prozesse, bei denen die Luftüberschusszahl deutlich kleiner als eins, aber größer als null ist. Bei Festbrennstoffen spricht man dann von Vergasung. Ist die Luftüberschusszahl gleich null (d. h. es wird kein Sauerstoff von außen zugeführt), spricht man von einer pyrolytischen Zersetzung des eingesetzten Festbrennstoffs. Dabei erfolgt dessen Aufspaltung in gasförmige, flüssige und feste Sekundärenergieträger unter Einwirkung von Wärmeenergie.

Verbrennung. Kohlenstoff (C) oder Wasserstoff (H) werden in Gegenwart von Sauerstoff (O_2) unter Energiefreisetzung zu Kohlenstoffdioxid (CO_2) oder Wasser (H_2O) oxidiert. Dieser Vorgang beschreibt die Verbrennung von Biomasse, die im Wesentlichen aus Kohlenstoff (C), Sauerstoff (O) und Wasserstoff (H) besteht und mit der chemischen Summenformel $C_nH_mO_p$ bezeichnet werden kann. Kommt es zu einer vollständigen Oxidation sämtlicher oxidierbarer Bestandteile des Brennstoffs, spricht man von vollständiger Verbrennung. Die Luftüberschusszahl muss dabei immer gleich oder größer als eins sein. Bei Luftmangel, das heißt bei Luftüberschusszahlen unter eins, verbleiben nach Ablauf der Oxidationsreaktionen noch un- oder teiloxidierte Brennstoffmengen (z. B. Kohlenstoffmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffe (C_nH_m)), die anschließend unter Energieabgabe weiter oxidiert werden können. Dann handelt es sich um eine unvollständige Verbrennung /4-14/.

Vergasung. Wird ein Brennstoff wie beispielsweise Kohlenstoff (C) unter Sauerstoffzugabe nicht zu Kohlenstoffdioxid (CO_2), sondern zu Kohlenstoffmonoxid (CO) oxidiert und damit teilverbrannt (d. h. die Luftüberschusszahl ist kleiner als eins und größer als null), spricht man von Vergasung oder auch von Teilverbrennung /4-14/. Das entstandene Gas – im genannten Beispiel CO – kann anschließend ggf. in einem anderen technischen Prozess an einem anderen Ort unter Energieabgabe weiter oxidiert werden. Mit Hilfe der Vergasung können also feste Brennstoffe in ein Brenngas und damit einen gasförmigen Sekundärenergieträger umgewandelt werden, der dann – zumindest theoretisch – mit bestimmten energietechnischen Verfahren z. B. zur Stromerzeugung effizienter nutzbar ist.

Neben dem eigentlichen thermochemischen Prozess der Vergasung (d. h. die Umwandlung eines Festbrennstoffs unter Teiloxidation in ein Brenngas) wird unter Vergasung oft auch die anlagentechnische Umsetzung (z. B. als Vergasungsanlage) verstanden.

Pyrolyse. Auch bei der Pyrolyse handelt es sich um einen thermochemischen Prozess. Er findet jedoch im Unterschied zur Verbrennung oder Vergasung ausschließlich unter der Einwirkung von Wärme und unter Sauerstoffabschluss statt (d. h. Luftüberschusszahl ist null). Da Biobrennstoffe Sauerstoff enthalten (bei Holz z. B. ca. 44 % O_2; vgl. Kapitel 4.1.1), kann es sich bei den Zersetzungsreaktionen trotzdem um Oxidationsreaktionen handeln /4-14/.

Außer für den beschriebenen thermochemischen Prozess der pyrolytischen Zersetzung organischer Substanz unter Wärmeeinwirkung wird der Begriff der Pyrolyse auch für die Herstellung von Flüssigenergieträgern aus fester Biomasse in entsprechenden technischen Anlagen (z. B. Pyrolyseanlage) verwendet.

Feuerungstechnischer Wirkungsgrad. Der feuerungstechnische Wirkungsgrad η_f berücksichtigt die Abgasverluste der Feuerung in Form von thermischen und chemischen Verlusten. Wichtige Bestimmungsgrößen sind die Abgastemperatur, der Luftüberschuss (O_2- oder CO_2-Gehalt) sowie der Gehalt an Kohlenstoffmonoxid (CO) und ggf. weiteren unverbrannten Abgaskomponenten. Die Verluste durch Strahlung und Konvektion der Feuerung sowie Stillstandsverluste werden im feuerungstechnischen Wirkungsgrad dagegen nicht berücksichtigt.

Der feuerungstechnische Wirkungsgrad η_f berechnet sich nach Gleichung (5-2) unter Berücksichtigung der relativen thermischen Verluste (V_{therm}) durch fühlbare Wärme der Abgase und der relativen chemischen Verluste (V_{chem}) durch unvollständige Verbrennung. Die thermischen und chemischen Verluste werden auf die Energiemenge des mit dem Heizwert bewerteten Brennstoffs bezogen.

$$\eta_f = 1 - V_{therm} - V_{chem} \qquad (5\text{-}2)$$

Kesselwirkungsgrad. Beim Kesselwirkungsgrad η_k wird die mit einem Wärmeträgermedium (z. B. Wasser) abgeführte Wärmeenergie in Beziehung zur zugeführten Brennstoffenergie (d. h. Heizwert mal Brennstoffmasse) gesetzt. Hier werden neben den Abgasverlusten, die in den feuerungstechnischen Wirkungsgrad einfließen, zusätzlich auch die Strahlungs- und Rostverluste berücksichtigt. Strahlungsverluste entstehen durch Wärmeabgabe der heißen Feuerung an den Heizraum und Rostverluste durch unverbrannte Rückstände in der Asche. Der Kesselwirkungsgrad liegt meist um einige Prozentpunkte niedriger als der feuerungstechnische Wirkungsgrad; bei guter Wärmedämmung der Feuerung und des Kessels und bei einem guten Ascheausbrand kann er diesem jedoch sehr nahe kommen.

Nutzungsgrad. Auch beim Nutzungsgrad η_n wird die abgeführte Wärmeenergie in Beziehung zur zugeführten Brennstoffenergie gesetzt; jedoch handelt es sich hierbei zum einen um einen sehr langen Betrachtungszeitraum mit wechselnden Einsatzbedingungen (z. B. Heizperiode, Kalenderjahr) und zum anderen um eine Betrachtung des gesamten Systems (z. B. eines Heizsystems). Das heißt, neben den Betriebsverlusten werden auch die Bereitschaftsverluste der Konversionsanlage (Auskühlung und Gluterhaltung) sowie die Verluste eines ggf. vorhandenen Speichers und der Wärmeverteilung berücksichtigt.

Der Nutzungsgrad ist eine der wesentlichen Kenngrößen, mit denen die „Güte“ einer energietechnischen Anlage beschrieben wird. Dabei kann zwischen dem Nutzungsgrad des Kessels und dem Nutzungsgrad der Anlage unterschieden werden. Ersterer umfasst den mittleren Kesselwirkungsgrad bei Volllast bzw. Teillast und die Anfahr- und Abfahr- sowie Bereitschaftsverluste. Der Anlagennutzungsgrad kann darüber hinaus Speicher-, Verteilungs- und sonstige Verluste enthalten.

5.2 Ablauf der Verbrennung

Die Verbrennung von pflanzlicher Biomasse umfasst eine Reihe verschiedener physikalischer und chemischer Prozesse, von der Trocknung über die Vergasung durch partielle Luftzufuhr bis hin zur anschließenden Oxidation von brennbaren Gasen und festem Kohlenstoff. In Bereichen des Feuerraumes ohne Luftzufuhr können lokal auch Prozesse der Pyrolyse anstelle der Vergasungsprozesse auftreten. Zusammenfassend kann der Vorgang in einer Festbettverbrennung im Wesentlichen durch folgende Teilprozesse beschrieben werden, wobei sich die Betrachtungen zur Vereinfachung nur auf die Hauptbrennstoffbestandteile C, H und O beziehen /5-7/:

- *Erwärmung* des Brennstoffs durch Rückstrahlung von Flamme, Glutbett und Feuerraumwänden,
- *Trocknung* des Brennstoffs durch Verdampfung und Wegtransport des Wassers bei Temperaturen ab ca. 100 °C,
- *Pyrolytische Zersetzung* des wasserfreien Brennstoffs durch Temperatureinwirkung bei Temperaturen ab ca. 150 °C,
- *Vergasung des wasserfreien Brennstoffs* mit Sauerstoff zu brennbaren Gasen (Kohlenstoffmonoxid, Kohlenwasserstoffe) und festem Kohlenstoff (ab ca. 250 °C),
- *Vergasung des festen Kohlenstoffs* mit Kohlenstoffdioxid, Wasserdampf und Sauerstoff zu Kohlenstoffmonoxid (ab ca. 500 °C),
- *Oxidation der brennbaren Gase* mit Sauerstoff zu Kohlenstoffdioxid und Wasser bei Temperaturen ab ca. 700 °C bis ca. 1 400 °C (real) bzw. bis ca. 2 000 °C (theoretisch),
- *Wärmeabgabe der Flamme* an die umgebenden Feuerraumwände und den neu zugeführten Brennstoff.

In der ersten Phase wird der aufgegebene Brennstoff zunächst erwärmt. Das erfolgt durch Rückstrahlung von der Flamme, dem Glutbett und den Feuerraumwänden aber auch durch Konvektion und Wärmeleitung im Brennstoff. Die Verdampfung des anhaftenden oder eingeschlossenen Wassers beginnt danach hauptsächlich bei Temperaturen oberhalb von 100 °C. Dabei schreitet die Trocknungsfront von außen nach innen fort, wobei die Trocknungsgeschwindigkeit von der Wärmeleitfähigkeit abhängt. Diese wiederum wird von der Rohdichte und – bei Holz – von der Faserrichtung beeinflusst.

Während das Brennstoffteilchen innen noch trocknet beginnt außen bereits die pyrolytische Zersetzung der Holzbestandteile (vgl. Kapitel 5.1), die durch Einwirkung höherer Temperaturen ausgelöst wird. Dabei kommt es zu einer Aufspaltung der langkettigen organischen Verbindungen, aus denen sich lignocellulosehaltige Biomassen zusammensetzen (u. a. Cellulose), in kürzerkettige Verbindungen, wobei brennbare Gase in Form von Kohlenstoffmonoxid (CO) und gasförmigen Kohlenwasserstoffen (C_nH_m) sowie Pyrolyse-Öle (Teere) gebildet werden.

Dieser Vorgang benötigt keinen Sauerstoff. Da Sauerstoff aber – auch unter Luftabschluss – in chemisch gespeicherter Form (bei Holz ca. 44 % i.d.TM, vgl. Kapitel 4.1.1) oder durch Luftzuführung stets vorhan-

den ist, kommt es unmittelbar nach der Aufspaltung zu mehr oder weniger vollständigen Oxidationsreaktionen unter Wärmefreisetzung.

Um den Prozess der Entgasung durch diese Wärmefreisetzung nicht nur in Gang zu halten sondern möglichst auch in der Leistung zu steuern, wird in Feuerungsanlagen gezielt an den Ort der pyrolytischen Zersetzung (z. B. Glutbett) Luftsauerstoff als sogenannte „Primärluft“ zugeführt. Bei diesem als Vergasung bezeichneten Teilprozess wird die benötigte Wärme aus unvollständigen Reaktionen der gasförmigen Pyrolyseprodukte mit Sauerstoff bereitgestellt. Um auch die festen und flüssigen Pyrolyseprodukte (Kohle, Teere) angreifen zu können, sind im Vergleich zur pyrolytischen Zersetzung mit zum Teil über 500 °C merklich höhere Temperaturen notwendig.

Im Teilprozess der Oxidation haben sich die Brenngase bereits teilweise im Feuerraum ausgebreitet, was sich am Flammenverlauf ablesen lässt. Unter Einwirkung von zum Teil gezielt zugeführtem Luftsauerstoff („Sekundärluft“) findet hier eine mehr oder weniger vollständige Oxidation der freigesetzten gasförmigen Produkte CO und C_nH_m statt, wobei unter Bildung von Zwischenprodukten (z. B. Wasserstoff) Kohlenstoffdioxid (CO_2) und Wasser entstehen. Der Abbau der Kohlenwasserstoffe erfolgt dabei über die Bildung von CO als Zwischenprodukt, das in einer weiter gehenden Oxidation zu CO_2 reagiert. Die Verbrennung ist in dieser Phase selbst-katalysiert und exotherm (d. h. wärmefreisetzend), und sie sendet Licht- und Wärmestrahlung aus, die sich in der sichtbaren Flamme äußert. Die Oxidationsreaktionen liefern damit die Energie für die überwiegend endothermen (d. h. wärmeverbrauchenden) Vorgänge der Erwärmung, der Trocknung sowie der pyrolytischen Zersetzung (Abb. 5.1).

Außer der von Flammenbildung gekennzeichneten Oxidation ist bei biogenen Festbrennstoffen ebenso die flammenlose Verbrennung bedeutsam. Diese Oxidationsform tritt im Endstadium des Verbrennungsvorganges auf. Der als Endprodukt der pyrolytischen Zersetzung gebildete feste Kohlenstoff (Entgasungsrückstand) wird dabei im Glutbett zuerst vergast (Feststoffvergasung) und anschließend in der Gasphase aufoxidiert /5-7/. Als Verbrennungsrückstand verbleibt die Asche.

Bei Holzfeuerungen ist das Phänomen des „knisternden Feuers“ bekannt. Die Ursache hierfür liegt in dem entweichenden Wasser, das bei der Trocknung bei hohen Temperaturen unter Druck gerät und die Zellwände sprengt. Besonders bei den harzreichen

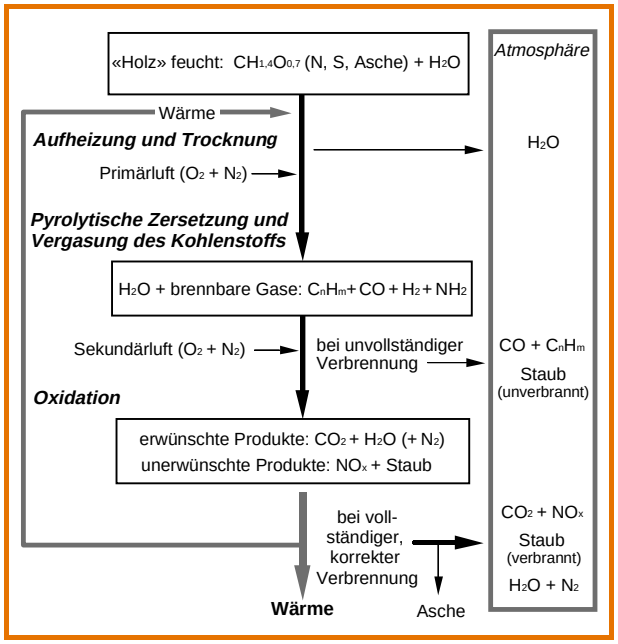


Abb. 5.1: Abbrandverhalten von Holz über Trocknung, Vergasung mit Primärluft und Oxidation der Gase mit Sekundärluft (nicht dargestellt ist der parallel zum Gasausbrand ablaufende Abbrand des Kohlenstoffs mit Primärluft) /5-5/

Nadelhölzern ist dieser Druck sehr hoch, da die Harze ab ca. 60 °C erweichen und somit die radialen Leitungsbahnen im Holz für den Wasserdampfaustritt verstopfen /5-3/.

Emissionsentstehung. Die bei der Verbrennung von Biomasse entstehenden luftgetragenen Verbrennungsprodukte können unterteilt werden in Stoffe aus unvollständiger und aus vollständiger Verbrennung (Abb. 5.1) sowie in Schadstoffe aus Spurenelementen bzw. Brennstoffverunreinigungen /5-5/.

Stoffe aus der vollständigen Oxidation der Hauptbrennstoffbestandteile (C, H, O) sind Kohlenstoffdioxid (CO_2) und Wasserdampf (H_2O). Sie sind ökologisch unproblematisch, wenn das CO_2 nicht aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe stammt und somit zum antropogenen Treibhauseffekt beiträgt.

Stoffe aus unvollständiger Oxidation der Hauptbrennstoffbestandteile (C, H, O) sind im Wesentlichen
- Kohlenstoffmonoxid (CO),
- Kohlenwasserstoffe (C_nH_m, Teere),
- Ruß (brennbarer Teil der Staubemissionen).

Kohlenmonoxid ist ein geruchloses Gas und wird – da es leicht messbar ist – i. Allg. als Indikator für die Güte einer Verbrennung verwendet. Die Kohlenwasserstoffe bilden dagegen eine Stoffgruppe mit wesentlich höheren Umwelt- und Gesundheitsrisiken, sind geruchlich wahrnehmbar und stellen den eigentlichen

Grund für Geruchsbelästigungen dar. Ruß ist dagegen ein fein verteilter, meist geflockter, fast reiner (elementarer) Kohlenstoff, er wird als Syntheseprodukt in fester Form abgeschieden und ist somit der Staubfraktion zuzurechnen.

Die Ursachen für eine unvollständige Verbrennung liegen nur selten in einer ungenügenden Sauerstoffzuführung begründet. Häufig ist die Verbrennungstemperatur in der Ausbrandzone (Oxidationszone) zu gering und die Reaktionen laufen zu langsam ab. Dies ist besonders dann der Fall, wenn zu feuchte Brennstoffe verwendet werden.

Zu einer unvollständigen Verbrennung kommt es aber auch wenn die Verweilzeit der Reaktionspartner in einer solchen heißen Zone zu gering ist (z. B. auf Grund zu klein dimensionierter Feuerräume). Das ist auch bei feuchten Brennstoffen der Fall; zu hohe Wassergehalte im Brennstoff mindern nicht nur die Verbrennungstemperatur sondern führen auch zu einer Erhöhung des Abgasvolumens, was zwangsläufig ebenfalls mit einer geringeren Aufenthaltszeit im Brennraum verbunden ist.

Außerdem kann die Durchmischung der gebildeten Brenngase mit der Verbrennungsluft (Sekundärluft) ungünstig sein, weil beispielsweise nicht genügend Turbulenz im Feuerraum erzeugt wird und die Brenngase somit nicht ausreichend mit Sauerstoff in Kontakt kommen.

Um eine möglichst vollständige Verbrennung zu erreichen sind eine Reihe von technischen Bedingungen zu erfüllen, sie sind u. a. in Kapitel 6 dargestellt. Die Freisetzung von Produkten unvollständiger Verbrennung lässt sich auch anhand von Abb. 5.1 nachvollziehen.

Zu den Schadstoffemissionen aus Spurenelementen bzw. Verunreinigungen zählen luftgetragene Aschepartikel (d. h. der nicht-brennbare Teil der Staubemissionen) und Schwermetalle (z. B. Cu, Pb, Zn, Cd), Schwefel-, Chlor- und Kaliumverbindungen (d. h. SO_2, HCl, KCl), Dioxine und Furane sowie Stickstoffverbindungen (d. h. NO, NO_2, HCN, NH_3, N_2O).

Eine besondere Bedeutung haben hierbei die Stickoxidemissionen NO und NO_2 (zusammengefasst NO_x). Sie entstehen im Wesentlichen aus dem im Brennstoff gebundenen Stickstoff, der von ca. 0,15 % (Holz) über 0,45 % (Stroh) bis ca. 4 % (Rapskörner) in einem relativ weiten Bereich schwanken kann. Allerdings wird der Brennstoffstickstoff bei der Verbrennung größtenteils in molekularen Stickstoff (N_2) und nicht zu NO_x umgewandelt. Ein sehr geringer Teil des Stickstoffs wird außerdem in die Asche eingebunden.

Die zweite wichtige NO_x-Bildungsursache ist die Reaktion von Luftstickstoff mit Sauerstoff. Hierfür müssen aber sehr hohe Temperaturen von mehr als 1 300 °C vorliegen; sie kommen jedoch bei der Biomasseverbrennung allenfalls örtlich und kurzzeitig vor. Daher spielt dieser Bildungsmechanismus nur bei den stickstofffreien Brennstoffen wie Heizöl oder Erdgas eine Rolle, da hier höhere Verbrennungstemperaturen auftreten.

5.3 Anforderungen an die Feuerungskonstruktion

Um einen hohen Wirkungsgrad und geringe Schadstoffemissionen zu erzielen, muss die Feuerungstechnik den besonderen Eigenschaften der biogenen Festbrennstoffe Rechnung tragen. Zu diesen besonderen Eigenschaften zählt vor allem der relativ hohe Gehalt flüchtiger Substanzen (Kapitel 5.1). Daraus leiten sich bestimmte konstruktive Anforderungen ab. Ausgehend von den in Kapitel 5.2 dargestellten Grundlagen lassen sich die wichtigsten Voraussetzungen für eine vollständige Brennstoffumsetzung wie folgt zusammenstellen.

- Zufuhr von Oxidationsmittel (Luft) im Überschuss,
- ausreichend lange Verweilzeit des Brenngas/Luftgemisches in der Reaktionszone,
- ausreichend hohe Verbrennungstemperatur und
- gute Vermischung der Brenngase mit Verbrennungsluft durch hohe Turbulenz.

Um vor diesem Hintergrund sowohl die Leistung als auch den Verbrennungsablauf einer Feuerungsanlage regeln zu können, wird versucht, die Feststoffumsetzung mit der Primärluftzuführung (im Glutbett) räumlich vom Gasausbrand mit der Sekundärluftzuführung (in der Nachbrennkammer) zu trennen. Beide Zuluftströme sollten getrennt regelbar sein. Die Primärluft beeinflusst damit die Feuerungsleistung, während die Sekundärluft hauptsächlich für die vollständige Verbrennung der brennbaren Gase verantwortlich ist.

Die geforderten hohen Temperaturen in der Sekundärverbrennungszone sind zumindest bei größeren Feuerungen meist problemlos realisierbar. Durch eine gute Vermischung der Brenngase mit Verbrennungsluft und eine hohe Verbrennungstemperatur kann der Luftüberschuss so gering wie möglich gehalten werden, um die Feuerung optimal und (nahezu) ohne Emissionen unverbrannter Gase betreiben zu können. Ein niedriger Luftüberschuss ist auch Voraussetzung für die Nutzung von feuchteren Brennstoffen. Hier

senkt der Energieverbrauch für die Verdampfung des Wassers das Temperaturniveau im Feuerraum tendenziell weiter ab und der entstehende Wasserdampf erhöht zusätzlich den Abgasvolumenstrom und dadurch den Energieaustrag aus der heißen Zone. Bei einem geringstmöglichen Luftüberschuss ist gleichzeitig auch der Wirkungsgrad am höchsten.

Neben der Optimierung des Luftüberschusses ist eine ausreichend hohe Verbrennungstemperatur durch Vermeiden unnötiger Wärmeabgabe im Feuerraum sicherzustellen. Dies geschieht meist durch eine wärmedämmende Auskleidung des Primär- und Nachverbrennungsraumes. Als feuerseitige Dämmmaterialien werden hierfür beispielsweise Schamotte, feuerfester Beton, Lava-Ton oder Keramikfasermaterialien verwendet. Für die meisten Feuerungsprinzipien gilt, dass der Hauptteil der Nutzwärme nicht schon im Feuerraum, sondern erst in einem vom Feuerraum getrennten Wärmeübertrager aus den heißen ausgebrannten Verbrennungsgasen gewonnen wird. Durch den verbesserten Gasausbrand in der Nachbrennkammer werden auch die Teerbildung und Rußablagerungen an den Wärmeübertragerflächen vermindert.

Eine frühzeitige Wärmeentnahme kann aber bei trockenen Brennstoffen oder speziellen Einsatzgebieten sinnvoll sein. Das ist der Fall, wenn zur Regulierung der Glutbetttemperaturen eine Abkühlung durch gezielte Nutzwärmeentnahme erwünscht ist (z. B. bei Brennstoffen, deren Aschen zur Verschlackung neigen, Kapitel 4.2.5). Bei Rostfeuerungen kommen hierzu wassergekühlte Roste zum Einsatz; dies ermöglicht einen Betrieb ohne überschüssige, als Kühlluft eingesetzte Primärluft. Auch können für trockene Brennstoffe wassergekühlte Feuerraumwände eingesetzt werden, die eine gesteuerte Wärmeabnahme erlauben (Kapitel 6.2.1.4).

Die genannten feuerungstechnischen Anforderungen werden gelegentlich als sogenannte „3-T-Regel“ für die Feuerungskonstruktion zusammengefasst („Time-Temperature-Turbulence“); d. h. dass die Durchmischungsintensität, Verweilzeit und Verbrennungstemperatur die wesentlichen zu optimierenden Bestimmungsgrößen darstellen. Das gilt insbesondere für biogene Festbrennstoffe mit ihrem hohen Gehalt an flüchtigen Bestandteilen.

5.4 Feuerungstechnische Besonderheiten der Beschickungsarten

In der Feuerungstechnik werden die beiden Gruppen der hand- und automatisch beschickten Anlagen unterschieden. Auf Grund der Unterschiede im Feuerungsablauf (kontinuierliche bzw. chargenweise Verbrennung), die die jeweilige Art der Beschickung mit sich bringt, werden diese Unterschiede nachfolgend zunächst erläutert, bevor anschließend in Kapitel 6 die eigentlichen Feuerungstechniken vorgestellt werden.

In automatisch beschickten Anlagen wird ein durch Zerkleinerung oder Pelletierung hergestellter, leicht dosierbarer Brennstoff eingesetzt. Dieser kann somit weitgehend kontinuierlich und automatisch in den Feuerraum eingebracht werden, um einen gleichbleibenden Feuerungsbetrieb mit konstanter Leistung einzustellen. Die gleichmäßige Brennstoffzuführung erlaubt eine an diese Brennstoffmenge angepasste Luftmengendosierung bei gleichbleibenden Temperaturen im Feuerraum. Eine derartige Optimierung führt letztlich auch zu entsprechend gleichbleibenden und relativ geringen Schadstofffreisetzungen (Abb. 5.2).

Die automatische Zuführung der schüttfähigen Brennstoffe erlaubt außerdem eine automatische Anpassung der Brennstoffmenge an den wechselnden Wärmebedarf. Automatisch beschickte Anlagen sind daher meist über einen relativ weiten Bereich teillastfähig (ca. 30 bis 100 % der Nennwärmeleistung). Wärmespeicher zur Überbrückung von Phasen mit niedriger Wärmenachfrage können deshalb relativ klein dimensioniert oder – unter bestimmten Bedingungen – auch ganz weggelassen werden.

Im Vergleich zu Anlagen mit automatischer Beschickung weisen diskontinuierlich von Hand beschickte Feuerungen ausgeprägte Schwankungen im zeitlichen Verlauf der Verbrennungsqualität auf. Dies gilt insbesondere für Anlagen ohne Gebläse („Naturzuganlagen“), zu denen die meisten Einzelfeuerstätten zählen (Kapitel 6.1.2). Hier wechseln die Randbedingungen der Verbrennung zwischen zwei Nachlegezeitpunkten erheblich. Mit dem Einschichten einer neuen Brennstofffüllung bewirken der kalte und noch feuchte Brennstoff und das Öffnen der Fülltür

zunächst eine Abkühlung. Gleichzeitig nimmt das Füllvolumen im Feuerraum während der anschließenden kontinuierlichen Abbrandphase ab, weshalb man auch vom „Chargenabbrand“ spricht. Mit dem veränderlichen Füllvolumen ändert sich bei vielen Feuerungsbauarten auch die Verweilzeit der gebildeten Brenngase. Die sich ständig ändernden Verbrennungsbedingungen lassen sich an der Konzentration des gebildeten Kohlenstoffdioxids (CO_2) und des Kohlenstoffmonoxids (CO) im Abgas ablesen (Abb. 5.2).

Für die abbrandphasenbezogene Dosierung der Luftzufuhr ergeben sich hieraus bestimmte Konsequenzen (Kapitel 6.1.4.3). Diese lassen sich am besten umsetzen, wenn ein Gebläse verwendet wird, durch welches die Luftmenge an den momentanen Verbrennungszustand angepasst werden kann. Durch geeignete Feuerungskonstruktion wird außerdem versucht – wie bei automatisch beschickten Anlagen – einen möglichst gleichmäßigen Abbrand mit konstanter Leistung und geringen Emissionen zu erreichen. Das Nachlegen des Brennstoffs und das veränderliche Füllvolumen sollen dabei einen möglichst geringen Störeinfluss ausüben.

Ein Feuerungsprinzip, bei dem diese Forderungen auch bei handbeschickten Feuerungen besonders konsequent umgesetzt wurden, stellt der sogenannte „untere Abbrand“ dar. Hier nimmt nur die unterste Schicht des Brennstoffbetts an der Verbrennung teil (Kapitel 6.1.4.1). Der Verlauf der CO_2- und CO-Konzentration im Abgas (Abb. 5.2, Mitte) zeigt eine gute Annäherung an den weitgehend gleichbleibenden Betriebszustand einer automatisch beschickten Feuerung.

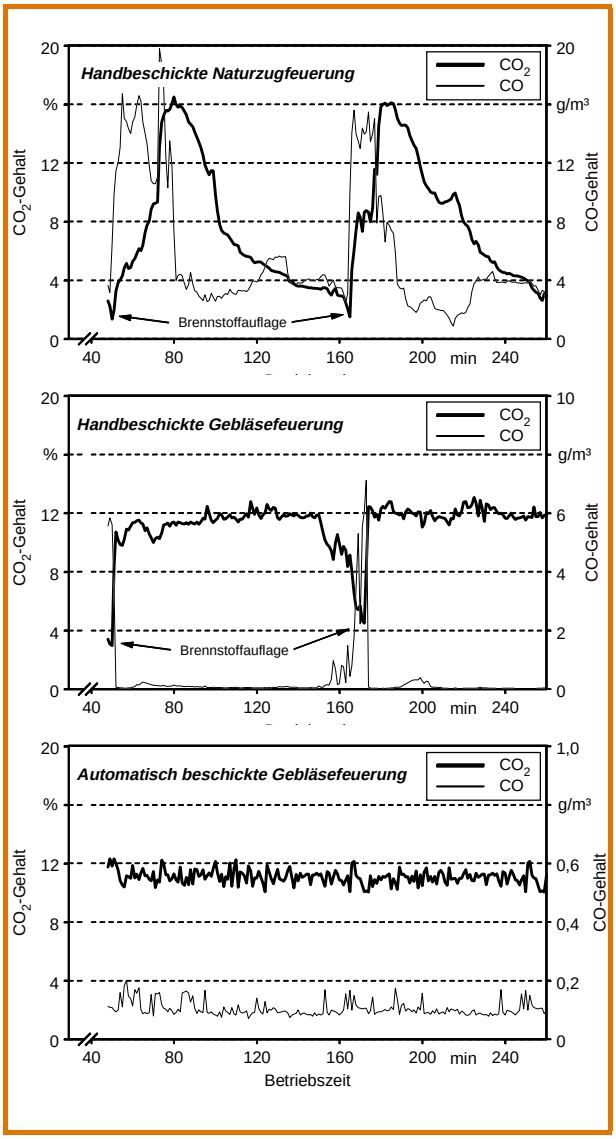


Abb. 5.2: Typischer Verlauf der Kohlendioxid(CO_2)- und Kohlenmonoxid(CO)-Konzentrationen im Abgas einer Naturzugfeuerung (Kachelofeneinsatz), einer handbeschickten Gebläsefeuerung (Stückholzkessel, unterer Abbrand) und einer automatisch beschickten Feuerung (Hackgutkessel) im betriebswarmen Zustand (Anheizphase nicht dargestellt) (nach /5-6/)

6 Feuerungen und Anlagentechnik

Bei den Feuerungsanlagen für biogene Festbrennstoffe wird zwischen hand- und automatisch beschickten Feuerungen unterschieden. Die weitaus variantenreichste Gruppe stellen die handbeschickten Anlagen dar. Sie werden nachfolgend beschrieben.

6.1 Handbeschickte Feuerungen

6.1.1 Bauarten und Verbrennungsprinzipien

Handbeschickte Holzfeuerungen können anhand verschiedenartiger Merkmale unterschieden werden /6-24/:

- Bauartengruppen: Einzelfeuerstätte, erweiterte Einzelfeuerstätte oder Zentralheizungskessel (Tabelle 6.1),
- Zugbedingungen: Naturzug oder gebläseunterstützter Zug,
- Rost: Rostlose Verbrennung oder Feuerungen mit Rost,
- Lage des Rostes: Flachfeuerung oder Füllfeuerung,
- Feuerungsprinzip: Durchbrand, oberer Abbrand oder unterer Abbrand.

Zu den wichtigsten Unterscheidungsmöglichkeiten zählen die Feuerungsprinzipien, die nachfolgend erläutert werden sollen. Ihre Anwendung in den einzelnen Bauartengruppen (Tabelle 6.1) wird in den daran anschließenden Kapiteln 6.1.2 bis 6.1.4 dargestellt. Die bei handbeschickten Feuerungen üblichen Feuerungsprinzipien (Durchbrand, oberer Abbrand und unterer Abbrand) werden in Abb. 6.1 schematisch dargestellt. Dabei lassen sich die beiden erstgenannten oft nicht eindeutig voneinander abgrenzen. Sie werden deshalb in der Literatur und in der Praxis nicht immer als eigenständige Feuerungsprinzipien betrachtet, sondern oft als unterschiedliche Betriebsweisen ein und derselben Feuerung angesehen. Da das Durchbrand- und das obere Abbrandprinzip in unterschiedlichen Bereichen entwickelt wurden (in der Kohle- (Durchbrand) bzw. Holzfeuerung (oberer Abbrand)) und in der Praxis Anlagen mit entsprechender Merkmalausprägung angeboten werden, werden sie nachfolgend separat diskutiert. De facto besteht allerdings zwischen ihnen ein fließender Übergang; viele Anlagen (vor allem Einzelfeuerstätten) vereinen beide Prinzipien zu einer Mischform oder erlauben den Wechsel von der einen zur anderen Feuerungsart.

6.1.1.1 Durchbrand

Bei der Durchbrandfeuerung wird die Verbrennungsluft durch den Rost und somit durch die gesamte Brennstoffschichtung geführt. Die Zündung erfolgt von unten, und das Glutbett entwickelt sich über dem Rost unterhalb des restlichen Brennstoffvorrats. Dadurch wird der gesamte Brennstoff erhitzt und befindet sich gleichzeitig in Reaktion. Hierin liegt auch ein wesentlicher Nachteil dieses Prinzips; eine Anpassung der Verbrennungsluftmenge an die unterschiedliche Brenngasfreisetzung ist schwierig, insbesondere dann, wenn die Brennstoffauflage sehr groß ist und somit keine räumlich voneinander getrennte Entgasung und Nachverbrennung mehr stattfinden kann. Daher sind derartige Feuerungen am besten durch häufiges Nachlegen kleiner Brennstoffmengen zu betreiben, um einen möglichst gleichmäßigen Verbrennungsablauf zu erzielen. Dennoch ändern sich die Verbrennungsbedingungen mit jedem Nachlegen, weshalb man bei Durchbrand- und auch bei oberen Abbrandfeuerungen vom sogenannten „Chargenabbrand“ spricht.

In Kleinfeuerungen stellt der Durchbrand das klassische Verbrennungsprinzip der (kurzflammigen) Kohlenbrennstoffe dar. Bei ihnen ist der Anteil der gebildeten flüchtigen Substanzen („Brenngase“) relativ gering und der größte Teil der Wärmeenergie stammt aus dem Abbrand des festen Kohlenstoffs.

Tabelle 6.1: Bauarten und Merkmale handbeschickter Holzfeuerungen (einschl. Pelletöfen) /6-24/

Bauart	Heizleistung in kW	Verbrennungsprinzip	Merkmale
Einzelfeuerstätten (Wärmenutzung bauartbedingt hauptsächlich im Aufstellraum):			
offener Kamin	0 – 5	Durch-/oberer Abbrand	ohne und mit Warmluftumwälzung, ungeeignet als Permanent-Heizung
Geschlossener Kamin	5 – 15	Durch-/oberer Abbrand	mit Warmluftumwälzung, Sichtscheibe
Zimmerofen	3 – 10	Durch-/oberer Abbrand	vom Wohnraum aus befeuerter Holzofen ohne feste Installation
Kaminofen	4 – 12	Durch-/oberer Abbrand	wie Zimmerofen, mit Sichtscheibe
Speicherofen, (Grundofen oder Warmluftkachelofen)	2 – 15	Durch-/oberer Abbrand, unterer Abbrand (selten)	langsame Abgabe gespeicherter Wärme über 10 bis 24 h durch Strahlung (Grundofen) oder mit Konvektionsluft (Warmluftkachelofen)
Küchenherd	3 – 12	Durch-/oberer Abbrand unterer Abbrand	Kochwärme (Primärnutzen), Heizwärme oder Sitzbankheizung (Sekundärnutzen)
Pelletofen	2,5 – 10	Schalen- bzw. Unterschubbrenner	automatisch beschickt, geregelte Brennstoff- und Luftzufuhr (Gebläse)
Erweiterte Einzelfeuerstätten (Wärmenutzung bauartbedingt auch außerhalb des Aufstellraums):			
Zentralheizungsherd	8 – 30	Durch-/oberer Abbrand unterer Abbrand	Wärme dient zum Kochen und für Zentralheizung/Brauchwassererwärmung
Erweiterter Kachelofen und Kamin	6 – 20	Durch-/oberer Abbrand	Wasser-Heizkreislauf oder zirkulierende Warmluft (Hypokaustenheizung)
Pelletofen mit Wasserwärmeübertrager	bis 10	Schalen- bzw. Unterschubbrenner	auch zur alleinigen Hausheizung (z. B. bei Niedrigenergiebauweise)
Zentralheizungskessel (Wärmenutzung nur außerhalb des Aufstellraums):			
Stückholzkessel	10 – 250 (max. 800)	unterer Abbrand Durchbrand (selten)	bis 1 m Scheitlänge, Naturzug- oder Gebläsekessel, Wärmespeicher erforderlich

Auch wirkt sich die meist fehlende klare Trennung zwischen Entgasungs- und Nachverbrennungszone bei Kohlenbrennstoffen weniger nachteilig aus. Dennoch wird das Durchbrandprinzip auch bei Holzfeuerungen im Bereich der Einzelfeuerstätten (insbesondere Kaminöfen und Kamine) angewendet, da hier eine problemlose Entaschung durch den Rost und den Aschekasten möglich ist. Bei modernen Scheitholz-Zentralheizungskesseln sind Durchbrandfeuerungen jedoch heute kaum noch gebräuchlich.

6.1.1.2 Oberer Abbrand

Im Gegensatz zur Durchbrandfeuerung wird die Verbrennungsluft beim oberen Abbrand nicht durch einen Rost geleitet, sondern gelangt seitlich zur Glutbettzone (Abb. 6.1). Die erste Brennstoffcharge wird von oben gezündet; in der ersten Abbrandphase bildet sich hier die Glutzone. Da die Flammen und die heißen Brenngase ungehindert nach oben steigen können, werden in der Nachbrennkammer die für einen vollständigen Ausbrand benötigten hohen Betriebstemperaturen relativ schnell erreicht, während sich der Brennstoffvorrat langsam von oben nach unten erhitzt. Die Gasfreisetzung erfolgt somit gebremst; der

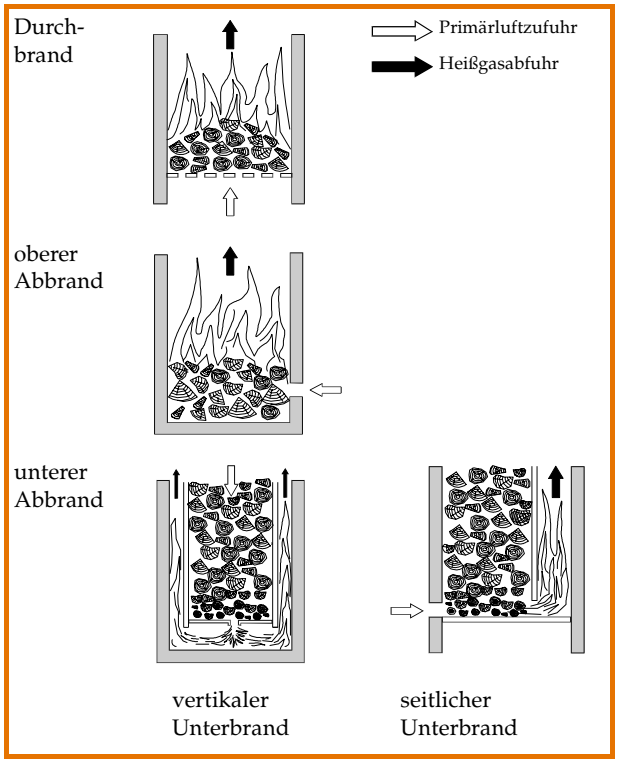


Abb. 6.1: Abbrandprinzipien bei handbeschickten Holzfeuerungen (Sekundärluftzuführung und Nachverbrennungsbereich nicht dargestellt) /6-24/

Holzvorrat brennt gleichmäßiger und kontrollierter ab, als bei einer Durchbrandfeuerung. Allerdings variiert hierbei das Feuerraumvolumen mit der Abnahme der Brennstofffüllhöhe, und die Gasverweilzeit für die Nachverbrennung der Brenngase ändert sich kontinuierlich, sofern die Feuerung nicht über eine entsprechende Sekundärluftzuführung verfügt /6-24/. Somit liegt die größte Verweilzeit zum Schluss des Abbrands einer Charge vor, und nicht – wie es für einen optimalen Verbrennungsablauf wünschenswert wäre – am Anfang.

Beim Nachlegen wird neuer Brennstoff auf die verbliebene Grundglut gelegt; die nachfolgende Abbrandperiode ähnelt somit der Durchbrandfeuerung. Auch beim oberen Abbrand sind kleinere Nachlegemengen in häufigeren Intervallen von Vorteil. Da aber die Verbrennungsluft (Primärluft) über und nicht durch das Glutbett geleitet wird, kann ein übermäßiges Anfachen der in der Asche liegenden Glut vermieden werden. Vielfach werden solche Feuerungen daher ohne Rost gebaut; dies hat allerdings den Nachteil, dass dann die Ascheentnahme nur bei abgekühlter Anlage erfolgen kann.

Das Prinzip des oberen Abbrandes wird in Einzelfeuerstätten (z. B. Grundofenfeuerungen; Abb. 6.5, links) eingesetzt. Wie bei den Durchbrandfeuerungen wird auch beim oberen Abbrand in der Regel auf ein Zuluftgebläse verzichtet („Naturzugbetrieb“). Die Luftmenge wird über Veränderungen der Lufteinlassöffnungen und über Kaminzugklappen geregelt.

Durchbrand- und obere Abbrandfeuerungen kommen selten „reinrassig“ vor, sondern werden meist miteinander kombiniert. Zur Verwendung verschiedener Brennstoffarten (z. B. Holzscheite, Kohlenbriketts) lassen sich derartige Einzelfeuerstätten (z. B. Kaminöfen) oft auf die jeweils andere Betriebsart umschalten. In solchen „Kombibrandanlagen“ werden Kohlenbrennstoffe im Durchbrand eingesetzt (überwiegend Rostluft), während bei Holzbrennstoffen die Verbrennungsluft seitlich oder von oben zugeführt wird (oberer Abbrand). Kleinere Rostluftmengen können aber auch beim Holzbrand vorteilhaft sein, da sie den vollständigen Abbrand des Holzkohlerückstandes unterstützen.

6.1.1.3 Unterer Abbrand

Anders als bei den beiden vorgenannten Verbrennungsprinzipien werden beim unteren Abbrand die Heißgase nicht nach oben abgeführt, sondern die Flammen breiten sich unterhalb des Feuerraumbodens oder zur Seite hin aus („Unterbrandfeuerungen“). Dadurch nimmt nur die jeweils unterste Schicht des Brennstoffbetts an der Verbrennung teil. Die im Bereich der Primärluftzufuhr freigesetzten Brenngase werden über einen Gebläsezug in eine unten ("Sturzbrand") oder seitlich ("seitlicher Unterbrand") neben dem Brennstoff-Füllraum liegende Brennkammer gelenkt, in der sie unter Sekundärluftzugabe nachverbrennen (Abb. 6.1). Beim seitlichen Unterbrand kann ein Teil der Primärluft auch durch einen Bodenrost eintreten, der die Entaschung und den vollständigen Holzkohleabbrand unterstützt.

Das über der Glutzone liegende Holz dient als Brennstoffreserve, die im Verlauf des Chargenabbrands selbsttätig nachrutscht und somit einen quasikontinuierlichen Brennstoffnachschub ermöglicht. Im Gegensatz zum Durchbrand- und oberen Abbrand-Prinzip ist beim unteren Abbrand-Prinzip die Füllmenge des Brennstoffschachtes für den Verbrennungsablauf weitgehend unerheblich. Sie beeinflusst jedoch den Bedienkomfort, da bei großen Füllvolumina ein häufiges Nachlegen unterbleiben kann; die Abbranddauer einer Charge in einem solchen Scheitholzkessel kann bis zu fünf Stunden und länger betragen.

Der untere Abbrand ermöglicht eine relativ kontinuierliche pyrolytische Zersetzung und Vergasung des Brennstoffes. Dies verbessert die Anpassung der Verbrennungsluftmenge an die freigesetzte Brenngasmenge, wodurch ein guter Ausbrand und somit eine hohe Verbrennungsqualität erreicht werden.

Das untere Abbrandprinzip stellt auf Grund dieser Vorteile bei Stückholz-Zentralheizungskesseln (Kapitel 6.1.4) das mit Abstand am häufigsten verwendete Feuerungsprinzip dar. Im Gegensatz zum Durchbrand und zum oberen Abbrand kann hierbei kaum auf eine Zwangsbelüftung (Saug- oder Druckgebläse) verzichtet werden. Das ist einer der Gründe – neben den optischen Bedürfnissen an das Flammenspiel – warum das Prinzip des unteren Abbrands in Einzelfeuerstätten nur selten eingesetzt wird. Auch sind Anlagen nach dem unteren Abbrandprinzip nur für stückiges Holz oder sehr grobes Hackgut gut geeignet. Weiterhin ist ein Nachfüllen während der Hauptabbrandphase nur bedingt möglich. Es besteht außerdem die Gefahr des Lochbrands (Brückenbildung über dem Glutbett), und die dann eintretende unvollständige Verbrennung kann zu entsprechend hohen Emissionen führen.

6.1.2 Einzelfeuerstätten

Einzelfeuerstätten geben ihre Wärme bauartbedingt nur an den umgebenden Raum ab. Das geschieht

Tabelle 6.2: Unterscheidungsmerkmale von Einzelfeuerstätten /6-24/

Einbauart	*vor Ort z. T. aus vorgefertigten Teilen handwerklich errichtet, nicht versetzbar* offener/geschlossener Kamin, Grund- und Warmluftkachelofen, Kachelherd	*industrielles Fertigprodukt, versetzbar* Zimmerofen, Kaminofen, Pelletofen, Küchenherd
Speichermasse	*gering bis mittel* offener/geschlossener Kamin, Zimmerofen, Kaminofen, Pelletofen, Warmluftkachelofen, Küchenherd, erweiterte Einzelfeuerstätten	*hoch („Speicherofen")* Kachel/Grundofen, Zimmer- oder Kaminofen mit großem Kachel- oder Specksteinmantel
Beschickungsart	*handbeschickt* offener/geschlossener Kamin, Kachel/Grundofen, Zimmerofen, Kaminofen, Küchenherd	*automatisch beschickt* Pelletofen, Pellet-Zentralheizungsherd
Typ. Betriebsdauer	*längere Betriebszeit*[a] geschlossener Kamin, Zimmerofen, Kaminofen, Pelletofen, Warmluftkachelofen, erweiterte Einzelfeuerstätten	*meist kurzzeitiger Betrieb* Grundofen, offener Kamin, Küchenherd
Wärmeabgabe	*strahlungsbetont* Kachel-/Grundofen, Zimmer- und Kaminofen ohne Zirkulationsschlitze, Küchenherd	*konvektionsbetont* Warmluftkachelofen, Pelletofen, Kaminofen mit Zirkulationsschlitzen, Einzelfeuerstätten mit Wassertaschen

a. mehrmals täglich bzw. permanenter Feuerungsbetrieb durch mehrmaliges Nachlegen

meist über Wärmestrahlung und zum Teil zusätzlich über Luftkonvektion. Zur Bauartengruppe der Einzelfeuerstätten zählen offene oder geschlossene Kamine, Zimmeröfen, Kaminöfen, Speicheröfen (einschließlich Warmluftkachelöfen) sowie Holz-Küchenherde und Pelletöfen (vgl. Übersicht in Tabelle 6.1). Sie werden in der Regel nur gelegentlich als Zusatzheizung betrieben.

Einzelfeuerstätten lassen sich nach vielerlei Kriterien unterscheiden (Tabelle 6.2). Sie werden z. B. in Flach- und Füllfeuerungen eingeteilt.

Bei Flachfeuerungen wird je Nachlegevorgang nur eine Lage Scheite eingefüllt (bei Küchen- und Zentralheizungsherden werden Flachfeuerungen zusätzlich über den Rostabstand zur Herdplattenoberseite definiert /6-4/, /6-5/). Zu den Flachfeuerungen zählen beispielsweise offene- und geschlossene Kamine, Kaminöfen sowie die Koch- und Heizherde im Kochmodus (Sommerbetrieb, Abb. 6.7). Hier beträgt die typische Einfüllmenge je Auflage zwischen 2 und 5 kg (beim Kochen auch weniger als 2 kg).

Füllfeuerungen sind dagegen für höhere Einfüllmengen geeignet; dadurch wird eine bestimmte Mindestabbranddauer bei Nennwärmeleistung gewährleistet („Dauerbrandöfen" /6-6/; z. B. Koch- und Heizherde im Heizmodus (Winterbetrieb) oder bestimmte Grundofenfeuerungen). Die Einfüllmenge liegt hier bei über 5 kg Brennstoff je Auflage.

Daneben gibt es eine Vielzahl weiterer Unterscheidungskriterien (Tabelle 6.2), die jedoch nicht immer eine scharfe Trennung der einzelnen Bauarten ermöglichen. Das liegt an der Vielfalt von Abwandlungen oder Mischformen, die eine eindeutige Zuordnung schwierig machen. Dadurch hat sich eine Vielzahl weiterer, teilweise parallel verwendeter Namen und Bezeichnungen eingebürgert. Begriffliche Unschärfen sind daher nicht vollständig vermeidbar.

Obgleich bei fast allen Bauarten auch Varianten mit Außenluftversorgung bestehen, werden Einzelfeuerstätten im Regelfall mit Luft aus dem beheizten Raum betrieben. Für den Kaminzug kritische Betriebszustände infolge der Raumluftentnahme sind aber in den meisten Fällen nur dann zu erwarten, wenn – wie bei moderner Bauweise mit dichten Türen und Fenstern – der sonst übliche „Verbrennungsluftverbund" (ca. 4 m³ Raumluft je kW Nennwärmeleistung) nicht ausreicht /6-50/. Das ist am ehesten bei offenen Kaminen, die mit hohem Luftüberschuss betrieben werden, zu erwarten. Schwierigkeiten treten aber auch auf, wenn für die Wohnraumlüftung Unterdrucksysteme eingesetzt werden, die den natürlichen Kaminzug begrenzen (z. B. Küchenabzug, kontrollierte Lüftung). Feuerungen ohne Gebläse sind in diesem Fall mit Außenluft zu versorgen.

Moderne Holzöfen sind generell durch eine Reihe von Merkmalen gekennzeichnet (Abb. 6.2). Sie verfügen über

- schamottierte, richtig dimensionierte Brennräume, in denen hohe Temperaturen und ausreichende Gasverweilzeiten ermöglicht werden,
- Umlenkeinbauten, die eine Verwirbelung und damit Durchmischung der Brenngase mit Luft verbessern,
- getrennte Primär- und Sekundärluftzufuhr,

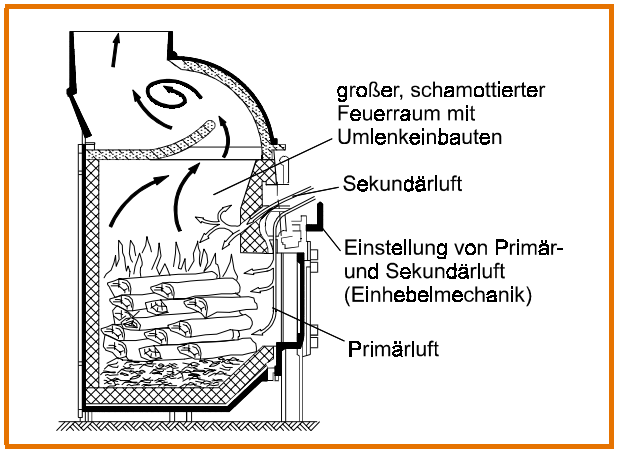


Abb. 6.2: Ausstattungsmerkmale eines modernen Holzofens /6-35/

- Einhebelmechanik für die einfache Veränderung des Verhältnisses von Primär- und Sekundärluft im Abbrandverlauf.

Bei fast allen neueren Ofentypen sind diese generellen Merkmale inzwischen anzutreffen. Nachfolgend werden die Ofen-Bauarten beschrieben.

6.1.2.1 Offene Kamine

Im Gegensatz zu allen übrigen Einzelfeuerstätten besitzt der offene Kamin einen zum Wohnraum hin offenen Feuerraum, der meist an seiner Rückwand und teilweise an den Seitenwänden ummauert ist. Er wird entweder aus vorgefertigten Schamotte-Bauteilen aufgebaut oder mit Hilfe eines Fertigbauteils – einem eisernen Kamineinsatz – errichtet. Eine definierte und gestufte Verbrennungsluftzufuhr ist nicht möglich. Um Gasaustritt in den Wohnbereich zu vermeiden, ist der Luftüberschuss sehr hoch. Die Verbrennungsluft wird aus dem Wohnraum entnommen; in einigen Fällen wird aber auch zusätzliche Außenluft über Luftkanäle zugeführt.

Beim offenen Kaminfeuer tritt der bei Einzelfeuerstätten häufige Nutzen als Zusatzheizung in den Hintergrund, es dient vielmehr primär der Wohnwertsteigerung. Die Wärme fällt hauptsächlich über die Abstrahlung an. Auf Grund der hohen Luftmenge ist die Verbrennungsqualität unzureichend (relativ niedrige Verbrennungstemperaturen bei hohem Luftüberschuss, folglich niedriger Wirkungsgrad und hohe Schadstoffemissionen). Daher ist eine Verwendung als ständiges Heizsystem auch rechtlich problematisch (vgl. Kapitel 8.4). In vielen Siedlungsgebieten wurden außerdem für offene Kamine und zum Teil auch für andere Einzelfeuerstätten Verbrennungsverbote ausgesprochen.

Geschlossene Kamine. Wenn für die Errichtung des Kamins ein Einsatz mit selbsttätig schließender Glastür oder Glasscheibe verwendet wird, handelt es sich um einen geschlossenen Kamin, der auch als „Heizkamin“ oder „Heizcheminée“ bezeichnet wird. Derartige Heizeinsätze umfassen den Feuerraum mit Aschekasten, den Abgassammler, die Heizgaszüge und den Abgasstutzen. Anders als der offene Kamin besitzen solche Bauformen einen geschlossenen Feuerraum (Abb. 6.3, links). Dadurch kann die Verbrennungsluftzufuhr besser kontrolliert werden, wodurch die Feuerraumtemperatur ansteigt und eine deutliche Steigerung des Wirkungsgrads und der Verbrennungsqualität bewirkt werden und vor allem kein Anstieg des Luftwechsels im Raum erfolgt. Bestehende offene Kamine können mit sogenannten „Kaminkassetten“ nachgerüstet werden.

Die Wärme wird zum Großteil durch Abstrahlung abgegeben. Viele geschlossene Kamine sind aber auch mit Konvektionskanälen und Warmluftröhren ausgestattet, über die – gelegentlich mit Gebläseunterstützung – warme Luft abgeleitet wird. Dadurch ist auch eine Wärmeabgabe an benachbarte Räume möglich (Kapitel 6.1.3).

6.1.2.2 Zimmeröfen

Anders als offene oder geschlossene Kamine sind Zimmeröfen (auch „Einzelöfen“) frei im Wohnraum stehende, meist gusseiserne Einzelfeuerstätten (auch „Eiserne Öfen“ genannt, obgleich auch Varianten mit Kachel- oder Specksteinhülle vorkommen). Der Brennstoff wird durch die obere von meist drei Türen in den Feuerraum gegeben, dieser ist im unteren Bereich zum Teil ausschamottiert. Die durch den Rost gefallene Asche wird im Aschekasten aufgefangen und durch die untere Tür abgezogen. Die Reinigung des Rostes kann über eine weitere Tür in Höhe des Rostes erfolgen. Aus praktischen Gründen ist dieser oft auch als Schüttelrost ausgebildet.

Die Zimmeröfen arbeiten in der Regel nach dem Durchbrandprinzip (vgl. Abb. 6.1). Der Anteil der von oben zugegebenen Luftmenge kann oft durch manuelle Klappen oder Schieber eingestellt werden, so dass dann die Oberluftmenge, die als Sekundärluft dient, überwiegt. Bei einfachen Ausführungen wird der Abbrand lediglich durch Drosselung der Gesamtluftzufuhr über einen Schieber oder eine Rosette in der Entaschungstür geregelt. Zimmeröfen können auch mit Kacheln oder Naturstein verkleidet sein. Dadurch wird die Speichermasse erhöht und die Wärmeabgabe ist gleichmäßiger.

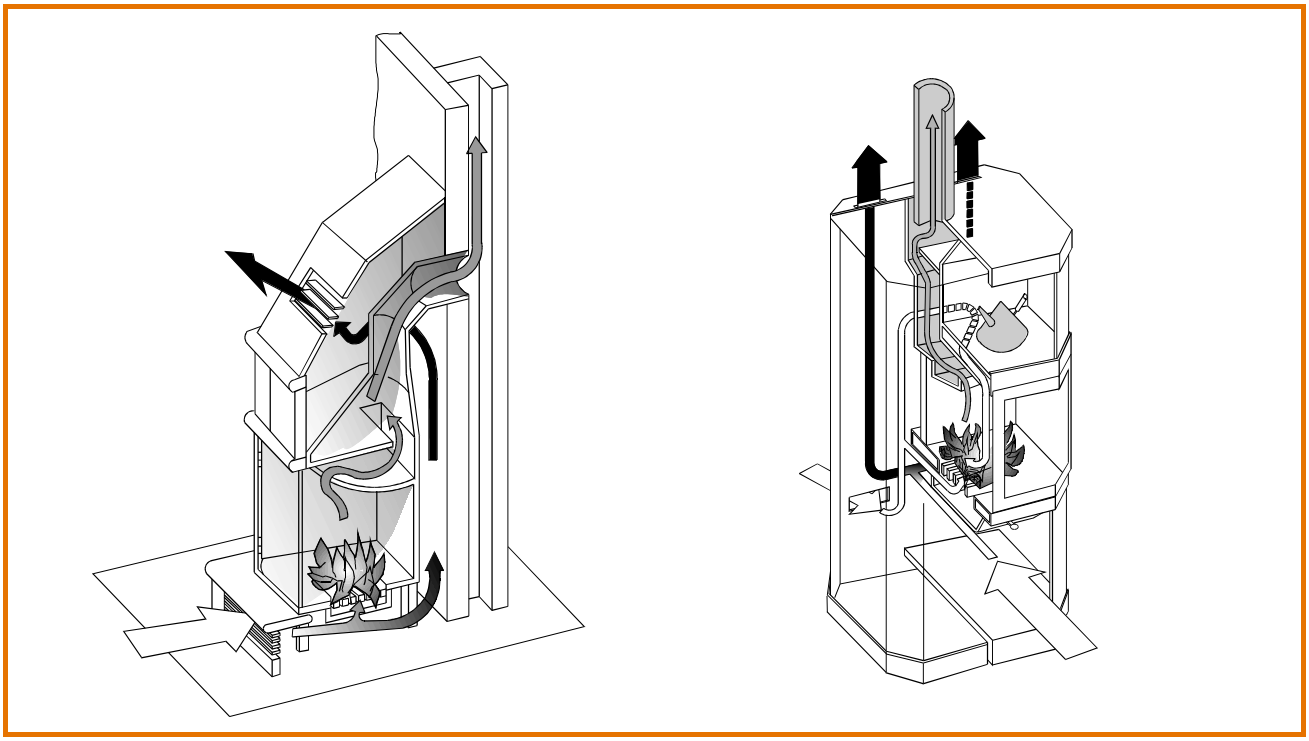


Abb. 6.3: Funktionsweise eines geschlossenen Kamins (links) und Kaminofens (rechts) (/6-24/ nach /6-49/)

6.1.2.3 Kaminöfen

Die moderne Variante des Zimmerofens ist der Kaminofen. Er wird ebenfalls frei im Wohnraum aufgestellt, besitzt jedoch eine im Betrieb luftdicht verschlossene Tür mit Sichtscheibe (Abb. 6.3, rechts).

Das Verbrennungsprinzip entspricht dem des Zimmerofens. Rost- bzw. Oberluft (Sekundärluft) werden je nach Brennstoffart zu unterschiedlichen Anteilen zugeführt. Allerdings dient die Oberluft hier zusätzlich als „Spülluft“; sie wird von oben entlang der Sichtscheibe zugeführt, um eventuelle Ruß- oder Staubablagerungen zu verhindern.

Wie die Zimmeröfen geben Kaminöfen einen großen Teil ihrer Wärme über Abstrahlung ab (ca. 50 %), wobei die Oberflächentemperatur bis 250 °C betragen kann. Ist ein Konvektormantel (Luftzirkulationsschlitze) vorhanden, kann die Abstrahlung bis auf 10 % der Gesamtnutzwärme sinken /6-50/. Für Kaminöfen gilt als spezifische Heizflächenbelastung ein maximaler Wert von 4 kW/m^2 /6-6/. Die Masse je kW Heizleistung liegt meist zwischen 13 und 26 kg. Je Quadratmeter Ofen-Heizfläche ist mit 40 bis 80 kg Gesamtgewicht zu rechnen /6-50/.

Bei der Aufstellung der Öfen sind die Vorschriften zum Brandschutz zu beachten. Bei brandgefährdeten Wänden sind beispielsweise bestimmte Mindestabstände einzuhalten (in der Regel 20 cm, wenn die Oberflächentemperatur der Wand nicht über 85 °C steigen kann, sonst 40 cm), oder bei brennbaren Fußböden sind Feuerschutz-Bodenplatten mit bestimmten Abmessungen gefordert. Ein Beispiel für häufig genannte Anforderungen bietet Abb. 6.4). Auch zu anderen brennbaren Teilen sind Mindestabstände einzuhalten (in der Regel ca. 40 cm). Diese Regeln sind aber bundesweit nicht einheitlich, daher ist hierzu eine Abstimmung mit dem zuständigen Kaminkehrer erforderlich (vgl. auch Kapitel 8.2).

Das richtige Heizen mit Einzelfeuerstätten

- nur naturbelassenes Holz verbrennen (kein behandeltes, beschichtetes oder lackiertes Holz!)
- nur trockenes Holz verwenden (ca. 2 Jahre trocken gelagert)
- richtig Anheizen: möglichst schnell hohe Feuerraumtemperaturen erreichen durch Verwendung von dünn gespaltenem trockenen Anmachholz oder Reisig
- Verbrennungsluftzufuhr beim Anheizen wie vom Ofenhersteller vorgegeben (z. B. Anheizklappe öffnen)
- größere Scheite erst einlegen, wenn ausreichend Grundglut vorhanden ist
- kleine Mengen Brennstoff nachlegen, nicht überfüllen!
- Heizwärmebedarf bevorzugt über Brennstoffnachlegemenge anstelle von Luftzufuhr regeln
- Türen der Feuerstätte immer fest verschlossen halten
- Tagesvorrat an Brennstoff nach Möglichkeit in beheizten Räumen bevorraten (Brennstoffvorwärmung)

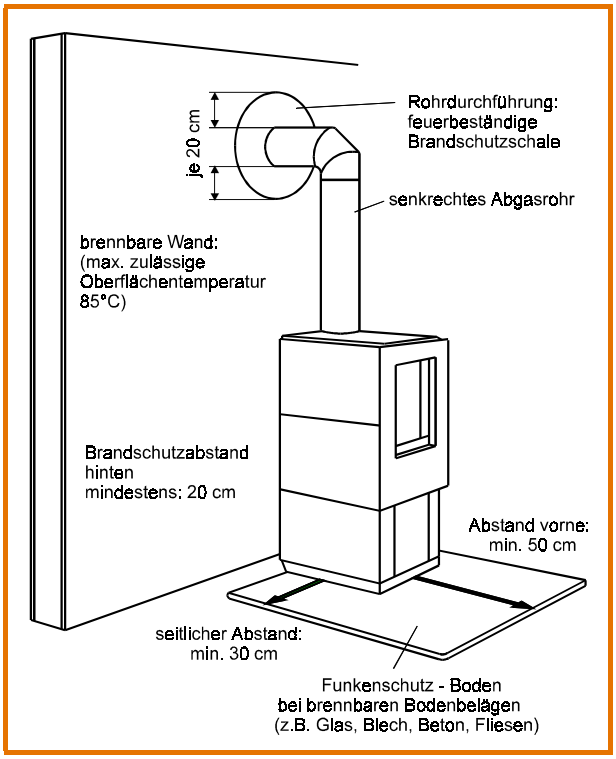


Abb. 6.4: Häufig genannte Anforderungen und Sicherheitsabstände bei der Aufstellung von Kaminöfen im Wohnraum mit brennbaren Wänden und brennbaren Fußböden (nach /6-48/), im Einzelfall können die Länderverordnungen hiervon abweichen, vgl. Kapitel 8.2)

Wie die Kamine oder Zimmeröfen werden auch die Kaminöfen bevorzugt in der Übergangszeit oder als Zusatzheizung verwendet. Die Nachlegeintervalle sind kurz, da nur jeweils eine Lage Brennstoff eingebracht wird. Öfen, die ausschließlich für die Verwendung von Holz ausgelegt sind, gelten deshalb in der Regel nicht als „dauerbrandfähig“ /6-6/.

6.1.2.4 Speicheröfen

Das wesentliche Merkmal eines Speicherofens besteht in der vergleichsweise großen Speichermasse für die erzeugte Wärme. Die heißen Gase werden in gemauerten Zügen durch diese Speichermasse geleitet; sie besteht hauptsächlich aus Zementputz, Kacheln, Ton, Schamotte oder Speckstein. Entsprechend sind auch die Begriffe Kachelofen, Kachelgrundofen, Grundofen und Specksteinofen gebräuchlich. Die Oberfläche, über die die Wärme als Strahlungswärme abgegeben wird, ist relativ groß und die Oberflächentemperatur damit relativ niedrig. Sie liegt bei einem mittelschweren Kachelofen zwischen 80 und 130 °C. Je nach Wanddicke beträgt die Wärmeabgabe zwischen 0,7 (schwerere Bauart) und 1,2 kW/m² (leichte Bauart) /6-50/. Trotz der heute üblichen Verwendung industriell vorgefertigter Bauteile bleibt diese Ofenbauart eine mit hohem handwerklichem Aufwand vom Ofensetzer vor Ort zu errichtende gemauerte Feuerung.

Die ursprüngliche Bauart des Speicherofens ist der gemauerte Grundofen aus Stein und Putz, der ein Gewicht von über einer Tonne besitzt /6-12/. Heutige Bauarten verwenden für die Feuerung und die Abgaszüge meist vorgefertigte Bausätze, bestehend aus Schamotteformsteinen und metallischen Bauteilen (Ofenfrontplatte mit Fülltür und Luftzuführöffnungen, Einlegerost).

Der Grundofen (Abb. 6.5, links) arbeitet meist nach dem oberen Abbrandprinzip (vgl. Abb. 6.1). Der Feuerraum und die Größe der Nachheizfläche (Abgaszüge) müssen dabei so aufeinander abgestimmt sein, dass die Temperatur der im Schornstein austretenden Abgase 140 bis 160 °C nicht übersteigt. Das Speichervermögen entspricht häufig genau der Wärmemenge, die bei einer einzigen (von oben gezündeten) Brennstofffüllung frei wird, so dass kein weiteres Holz auf die ausglühende Grundglut nachgelegt werden muss und darf. Durch die hohe Speichermasse erwärmt sich ein kalter Grundofen nur langsam; er strahlt jedoch auch nach dem Erlöschen der Glut noch lange Wärme ab. Grundöfen sind daher für den spontanen Einsatz weniger geeignet. Bei modernen Varianten kann die Luftzufuhr zwar auch automatisch gesteuert werden (z. B. durch elektrische Luftklappeneinstellung); die Regulierfähigkeit ist jedoch beschränkt. Auch ist der Platzbedarf relativ groß. Deshalb wurde eine Vielzahl mittlerer und leichter Varianten entwickelt, zu denen auch der Warmluft-(Kachel-)ofen zählt (Abb. 6.5, rechts).

Der Warmluft-(Kachel-)ofen besitzt im Vergleich zum eigentlichen Speicherofen meist weniger Spei-

Reinigung bei Einzelfeuerstätten

vor jedem Heizvorgang:
- Säubern von Feuerraum und Rost
- Entleeren des Aschekastens (abgekühlte Asche in den Hausmüll geben)

alle 4 bis 6 Wochen:
- Prüfen der Zuluftöffnungen (Flusen, Staub)
- Prüfen der Anheizklappe bzw. des Luftschiebers (Beweglichkeit durch Rost oder Ablagerungen eingeschränkt?)
- Reinigung der Heizgaszüge und Wärmetauscherflächen mit Bürsten bzw. Kratzern

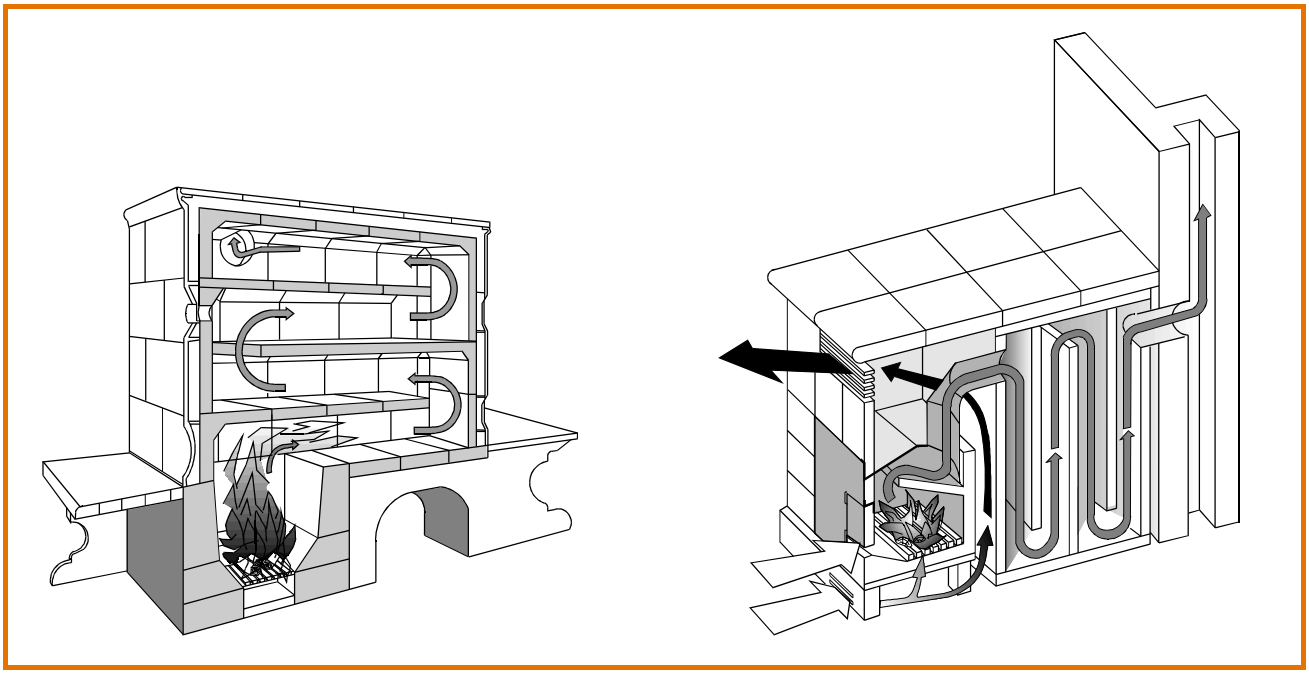


Abb. 6.5: Funktionsweise eines Kachel-Grundofens (links) und eines Warmluftkachelofens (rechts), hier mit gemauerten liegenden bzw. stehenden Zügen (/6-24/ nach /6-32/, /6-49/)

chermasse, vor allem wenn er nicht über gemauerte Züge verfügt. Bei diesem Ofentyp wird ein gusseiserner Heizeinsatz (sogenannter Kachelofenheizeinsatz) verwendet, um den herum die gemauerte Verkleidung (z. B. Kachelwand) in einem bestimmten Abstand errichtet wird. Im Sockelbereich der Kachelwand befinden sich offene Luftkanäle, so dass kalte Raumluft hinter den Kachelmantel strömen kann. Sie wird dort erhitzt, steigt auf und verlässt den Luftschacht durch oben angebrachte Warmluftgitter. Bei hohem Anteil dieser durch Konvektion abgeführten Wärme ist die Wärmeabstrahlung über die Kacheln entsprechend geringer. Viele Warmluftkachelöfen besitzen zusätzlich einen Nachheizkasten aus Gusseisen, Stahlblech oder Keramikplatten, der ebenfalls von einem hinterlüfteten Kachelmantel umgeben ist und zu etwa 20 % zur Wärmeabgabe beiträgt. Er stellt oft auch einen zusätzlichen Abscheideort für Flugasche dar. Der Nachheizkasten kann auch in einem benachbarten Raum aufgestellt sein, so dass die Feuerung bauartbedingt zu einer Mehrraumheizung wird (Kapitel 6.1.3).

Auch bei den Warmluft-Kachelöfen kann der Speicheranteil bei gemauerten Zügen relativ hoch sein (Abb. 6.1), so dass der Übergang zu den strahlungsbetonten Öfen fließend ist. Wie bei den Zimmer- und Kaminöfen werden Ausführungen mit und ohne Rost verwendet. Warmluft-Kachelöfen können auch mit Saugzuggebläse und abgasgeführter Verbrennungsluftregelung (Mikroprozessorsteuerung) ausgestattet sein. Moderne Kachelöfen werden auch mit Sichtscheibe angeboten, so dass sie ein ähnliches Erscheinungsbild bieten, wie geschlossene Kamine oder Kaminöfen. Bei einigen Bauarten kann die Verbrennungsluft über einen Außenluftkanal herangeführt werden, um einen raumluftunabhängigen Heizbetrieb zu ermöglichen.

6.1.2.5 Küchenherde

Der Küchenherd stellt eine Bauart dar, die vor allem den Bedürfnissen solcher Gemeinschaften entspricht, bei denen die Küche den Mittelpunkt des häuslichen Lebens bildet. Wenngleich die Zahl der neu installierten Herde inzwischen stark rückläufig ist, zählen sie immer noch zu den bedeutenden Bauarten bei Einzelfeuerstätten /6-19/. Küchenherde werden als industrielles Fertigprodukt oder als mehr oder weniger vorgefertigter Bausatz für die Errichtung vor Ort (z. B. als Kachelherd) angeboten.

Die Herde sind auf Koch- bzw. Heizbetrieb umstellbar. Damit im Kochbetrieb das Feuer möglichst nahe an der Herdplatte brennt, ist der Koch-Feuerraum niedrig („Flachfeuerung“), da die Rosthöhe entsprechend hoch eingestellt ist. Wenn im Winter jedoch geheizt werden soll, wird der Rost heruntergeklappt, so dass der gesamte Füll- bzw. Feuerraum über dem darunter liegenden zweiten Rost

genutzt werden kann und die Heizleistung sich infolge der vergrößerten Wärmetauschflächen etwa verdoppelt (vgl. Abb. 6.7). Wenn es sich um einen Herd handelt, bei dem die Roststellung über eine Hebeeinrichtung variierbar ist, kann die Umstellung auch während des laufenden Betriebs erfolgen.

Im Naturzug betriebene Herde arbeiten in jeder Betriebsart nach dem Durchbrandprinzip. Bei Herden, die mit Saugzuggebläse ausgerüstet sind, wird dagegen auch das Prinzip des seitlichen Unterbrands (vgl. Abb. 6.1) angewendet, wobei auch in diesem Fall die Herdplatte durch die darunter entlang geführten heißen Abgase geheizt wird. Über entsprechende Klappen lässt sich auch eine ggf. vorhandene Backröhre aufheizen.

Im Winterbetrieb erlaubt der vergrößerte Füllraum die Verwendung größerer Holzscheite als beim ausschließlichen Kochbetrieb mit relativ engem Brennraum. Die meisten Heizungsherde verfügen über getrennte Primär- und Sekundärluftzuführungen sowie über eingeschränkte Möglichkeiten zur Leistungsregelung. Auch kombinierte Herd-Kachelöfen werden angeboten, bei denen die Heizgase über eine Umstellklappe vom Herdbetrieb in Kachelofenzüge auch in benachbarte Räume umgeleitet werden können.

6.1.2.6 Pelletöfen

Mit der Einführung von normierten Holzpellets (Kapitel 4) wurden die Bauarten der Einzelfeuerstätten um den Pelletofen erweitert. Hier kommen die Vorteile einer automatischen Beschickung auch bei den sehr kleinen Leistungen des Wohnraumbereichs zum Tragen. Durch die Verwendung von Pellets mit gleichbleibenden Brennstoffmerkmalen (üblicherweise ca. 6 mm Durchmesser) und einem niedrigen Wassergehalt (< 12 %) werden die Schwankungen im Feuerungsablauf minimiert. Hierin unterscheidet sich der Pelletofen vom Kaminofen, obgleich er ebenfalls über ein Sichtfenster zur Beobachtung des Flammenspiels verfügt und deshalb auch als Pellet-Kaminofen bezeichnet wird.

An der Rückseite des Ofens wird der Brennstoff in einen Vorratsbehälter eingefüllt. Das geschieht bei Einzelfeuerstätten meist von Hand. Auf Grund der hohen Schüttdichte der Holzpellets (ca. 650 kg/m³) kann eine relativ große Brennstoffmenge eingefüllt werden (ca. 20 bis 50 kg). Je nach Lastzustand genügt dieser Vorrat für ca. 1 bis 4 Tage. Über eine Förderschnecke werden die Pellets in einem Steigrohr bis zur Öffnung einer Fallstrecke gefördert, über welche sie in

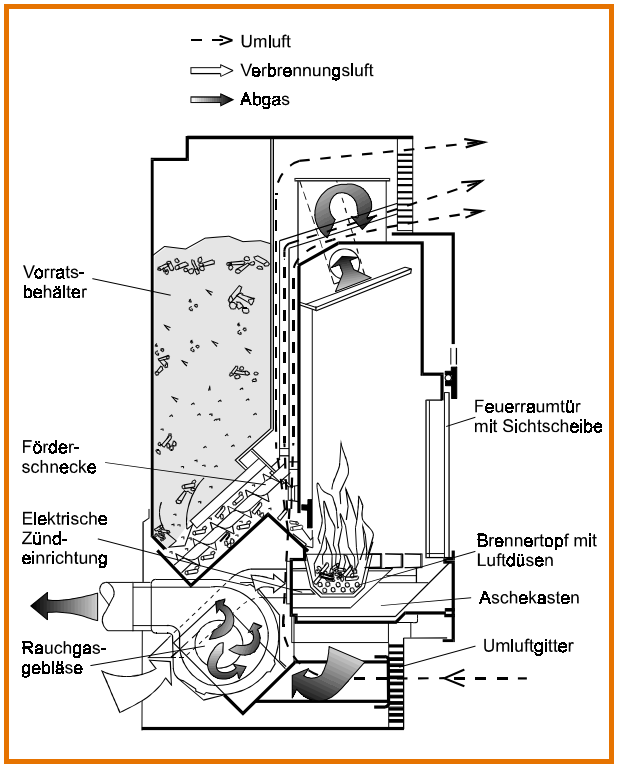


Abb. 6.6: Funktionsweise eines Pelletofens (/6-24/ nach /6-59/)

eine Brennschale (Brenntopf) gelangen (Abb. 6.6). Beim ersten Anzünden wird darin entweder von Hand (Anzündfeuer), meist aber mittels einer elektrischen Zündung (Heißluftgebläse oder Heizstab) gezündet. Die Primärluft wird über Luftdüsen (Bohrungen) im Brennschalenboden zugeführt, während die Sekundärluft über seitlich oberhalb des Brennstoffs bzw. des Glutbetts in Form von ringförmig angeordneten Zuluftdüsen durch die Brennschalenwand einströmt (zum Feuerungsprinzip vgl. Kapitel 6.2.1.3). In der Regel wird auch ein kleinerer Zuluftstrom über den Fallschacht eingeleitet, um die Rückbrandgefahr zu mindern. Wie bei den Kaminöfen muss zusätzliche Frischluft („Spülluft“) von oben entlang der Sichtscheibe abwärts geführt werden, um sichtmindernde Staub- oder Rußablagerungen zu vermeiden. Im Hinblick auf eine optimale Verbrennungsluftführung ist eine solche „optische“ Maßnahme jedoch stets mit Nachteilen verbunden, da die Spülluft nicht gezielt als Sekundärluft eingesetzt werden kann, sondern durch Erhöhung des Luftüberschusses tendenziell emissionserhöhend bzw. wirkungsgradmindernd wirkt. Generell aber nimmt der Pelletofen – nicht zuletzt auf Grund der hohen Brennstoffhomogenität (Kapitel 8.2) – hinsichtlich dieser beiden Parameter eine Spitzenstellung ein; der Kohlenstoffmonoxidausstoß liegt weit unter den Werten

anderer Einzelfeuerstätten und der Wirkungsgrad erreicht Werte von mehr als 90 % /6-33/ (vgl. Kapitel 7.1).

Die Luftzufuhr wird durch ein geräuscharmes gestuftes oder drehzahlgeregeltes Gebläse erzeugt. Der Lufteinlass erfolgt über einen zentralen Ansaugstutzen, so dass Pelletöfen bei Außenluftzuführung auch weitgehend raumluftunabhängig betrieben werden können. Diese Betriebsweise ist besonders bei kontrollierter Wohnraumlüftung von Bedeutung. Lediglich für die Fallschachtkühlung und Spülluft werden meist noch kleinere Luftmengen aus dem Aufstellraum entnommen.

Das Erscheinungsbild der Feuerung ähnelt dem einer Gasflamme. Die Wärmeabgabe erfolgt zum Teil über Strahlung, größtenteils aber über Konvektionsschächte (Abb. 6.6). Die anfallende Asche wird von Zeit zu Zeit aus der Brennmulde und dem Aschekasten von Hand entnommen. Pelletöfen sind wegen ihrer Lastvariabilität auch für den Dauerbetrieb geeignet. Sie werden mit Wärmeleistungen bis 10 kW angeboten und lassen sich auf ca. 30 % ihrer Nennwärmeleistung drosseln.

6.1.3 Erweiterte Einzelfeuerstätten

Im Übergangsbereich zwischen Einzelfeuerstätten und Zentralheizungskesseln kommen einige Mischformen und Sonderbauarten vor, die aus Einzelfeuerstätten hervorgegangen sind. Bei diesen Anlagen wird nur ein Teil der erzeugten Nutzwärme an den umgebenden Raum abgegeben bzw. zum Kochen oder Backen verwendet. Über einen zusätzlich vorhandenen Wasserwärmeübertrager wird Wärme an einen Heizkreislauf oder als Brauchwasser abgegeben. Gegebenenfalls kann die Wärmeabfuhr auch mittels heißer Luft erfolgen, die über spezielle Luftschächte entweder direkt (als Konvektionswärme) oder als Wärmeträgermedium zu großflächigen Heizflächen (z. B. hinterlüftete Kachelwände) in benachbarte Räume geleitet wird (Hypokaustenheizung oder Luft-Zentralheizung). Die so erweiterten Einzelfeuerstätten werden nachfolgend erläutert.

6.1.3.1 Zentralheizungsherde

Ein großer Teil der heute eingesetzten Holz-Herde dient nicht nur für Koch-, Back- und Küchenheizungszwecke, sondern auch für die Zentralheizung und Brauchwassererwärmung. Bei solchen Zentralheizungsherden sind Teile des Feuerraums mit Wassertaschen ummantelt und weitere Wasserwärmeübertrager in den Heizgaszügen untergebracht (Abb. 6.7). Überschüssige Wärme dient zur Erwärmung eines Wärmespeichers (Kapitel 6.1.4.3). Grundsätzlich gelten dabei die gleichen Randbedingungen wie bei handbeschickten Heizkesseln.

Zentralheizungsherde werden als vollwertige Wohnhausheizung oder als Zusatzkessel eingesetzt. Sie müssen die gleichen sicherheitstechnischen Standards eines Zentralheizungskessels erfüllen. Beispielsweise verfügen sie über eine thermische Ablauf-

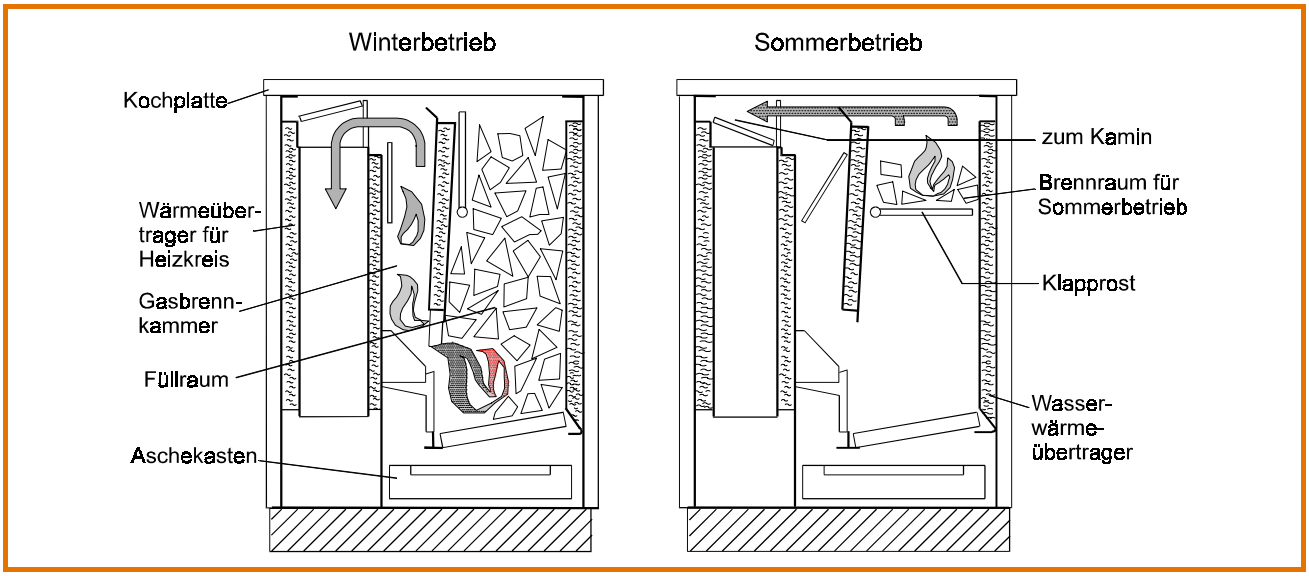


Abb. 6.7: Moderner Zentralheizungsherd mit unterem Abbrand (links: Winterbetrieb zum Kochen und Heizen; rechts: Sommerbetrieb nur Kochen; /6-24/ nach /6-54/)

sicherung gegen Überhitzung. Dabei handelt es sich um eine von der Vorlauftemperatur gesteuerte mechanische Vorrichtung, die beim Erreichen einer bestimmten Vorlauftemperatur (Überhitzung) den Wasserablauf im Wasserkreislauf eines Sicherheitswärmeübertragers öffnet, um die überschüssige Wärme abzuführen.

Zentralheizungsherde erreichen einen Gesamtwirkungsgrad von mindestens 65 %, wobei die Abstrahlung im Aufstellraum nicht als Verlust gewertet wird /6-5/ (vgl. Kapitel 5.1). Die Asche wird manuell entfernt; zur Staubvermeidung kann sie aber auch über einen „Aschefall" im Untergeschoss gesammelt werden.

6.1.3.2 Erweiterte Kachelöfen oder Kamine

Während bei den Zentralheizungsherden die Wärmeabgabe an das Heizmedium Wasser überwiegt, kommt es bei den erweiterten Kachelöfen oder Kaminen häufiger zu Bauweisen mit Warmlufttransport, durch den maximal etwa bis zu vier weitere angrenzende Räume beheizt werden können (Abb. 6.8). Das geschieht entweder über eine zum Teil gebläseunterstützte Warmluftableitung (Frischluft, Mischluft oder Umluft) oder durch zirkulierende Warmluft in einem geschlossenen Kreislauf. Letzteres System wird als Hypokaustenheizung bezeichnet; hier stellt die zirkulierende Warmluft das Wärmeträgermedium dar. Sie wird an den Wärmeübertragerflächen des Heizeinsatzes erwärmt, durch geeignete Klappenstellung einem oder mehreren Warmluftkanälen zugeleitet und gelangt so zu den Heizflächen der entsprechenden Räume. Diese Heizflächen sind als spezielle Hypokausten-Kacheln oder Keramikflächen, Naturstein oder Mauerung ausgebildet. An ihnen wird die Strahlungswärme abgegeben; durch die hohe Speichermasse erfolgt dies gleichmäßig und über einen relativ langen Zeitraum. Die Zirkulation wird meist durch Schwerkraft- und Auftriebseffekte aufrecht erhalten.

Kachelöfen, Kamine und sogar Kaminöfen können auch zur Wassererwärmung genutzt werden. Sie werden dann auch als Kachelofen-Heizkessel, Kaminheizkessel oder wasserführende Kaminöfen bezeichnet. Spezielle Wasser-Wärmeübertrageraufsätze („Wasserregister") können – sobald die Feuerung ihre Betriebstemperatur erreicht hat – durch geeignete Klappenstellung vom heißen Abgas durchströmt werden, um einen großen Teil der Wärme an ein flüssiges Wärmeträgermedium abzugeben (Abb. 6.9). Dadurch erfolgt die Brauch- oder Heizwassererwärmung. Bei Kaminen kann der Wasserwärmeübertrager auch in den geschlossenen Kreislauf einer Warmluftzirkulation eingebaut sein. In beiden Fällen ist die Verwendung von Wasserwärmespeichern sinnvoll (Kapitel 6.1.4.3). Kachelofen- oder Kaminfeuerungen mit Wasserwärmeübertrager werden bis zu einer Nennwärmeleistung von rund 20 kW eingesetzt.

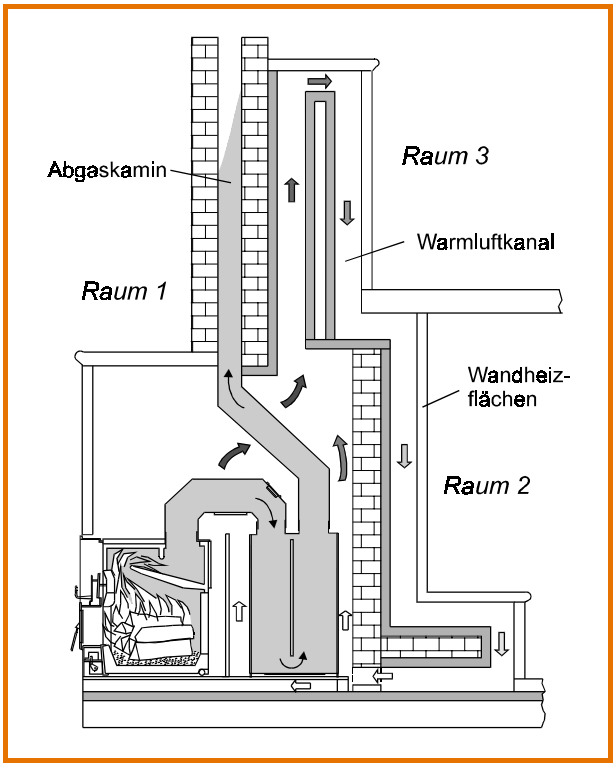


Abb. 6.8: Funktionsprinzip eines Hypokaustensystems mit Kachelofenheizeinsatz (/6-24/ nach /6-2/)

6.1.3.3 Pelletöfen mit Wasserwärmeübertrager

Da die automatische Brennstoffzuführung einen relativ weiten Leistungsbereich von ca. 30 bis 100 % der Nennwärmeleistung ermöglicht, kann die Wärmeabgabe von Pelletöfen besonders gut an den aktuellen Bedarf eines Hauses angepasst werden. Dieser Vorteil kommt vor allem bei Anlagen mit Wasserwärmeübertragern für die Heiz- und Brauchwassernutzung zum Tragen. Derartige Öfen werden in Kombination mit anderen regenerativen Energien (z. B. Solarwärme) oder fossilen Energieträgern zunehmend auch als Hauptheizung in Gebäuden mit Niedrigenergiebauweise eingesetzt. Zwischen 50 und 80 % der Wärmeabfuhr erfolgt hierbei über den Wasserwärmeübertrager, während im Wohnraum nicht auf eine sichtbare Holzflamme verzichtet werden muss. Ein Verzeichnis der anbietenden Hersteller findet sich im Anhang C.

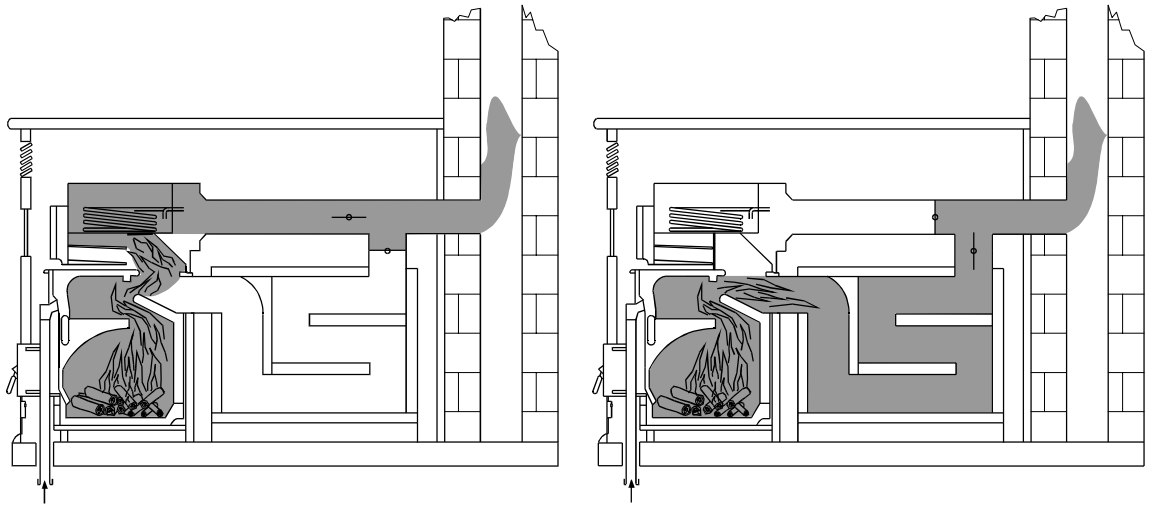


Abb. 6.9: Kachelofen mit Wasserwärmeübertrager (links: zusätzliche Wärmeeinspeisung in den Heizkreislauf; rechts: Heizbetrieb für den Aufstellraum; /6-24/ nach /6-2/)

6.1.4 Zentralheizungskessel (handbeschickt)

Anders als bei den Einzelfeuerstätten oder den erweiterten Einzelfeuerstätten wird bei den Zentralheizungskesseln versucht, jegliche Wärmeabgabe an den umgebenden Raum zu vermeiden, da sich der Aufstellort meist nicht in einem zu beheizenden Raum befindet und auch keine Kochwärmenutzung gegeben ist. Folglich sind Zentralheizungskessel mit einem Wasserwärmeübertrager auszustatten (Abb. 6.10) und an einen Heizwasserkreislauf anzuschließen; über diesen wird ein geregelter Wärmetransport zu den Heizflächen der jeweiligen Räume sichergestellt. Die Wärmeabstrahlung von der Geräteoberfläche ist hier als Verlustgröße anzusehen und muss durch entsprechende Verkleidung und Wärmedämmung minimiert werden.

Nachfolgend werden die technischen Aspekte der Scheitholz-Zentralheizungen angesprochen. Eine Übersicht über die anbietenden Hersteller findet sich im Anhang C. Umwelt- und Kostenaspekte werden in Kapitel 7 und 9 angesprochen.

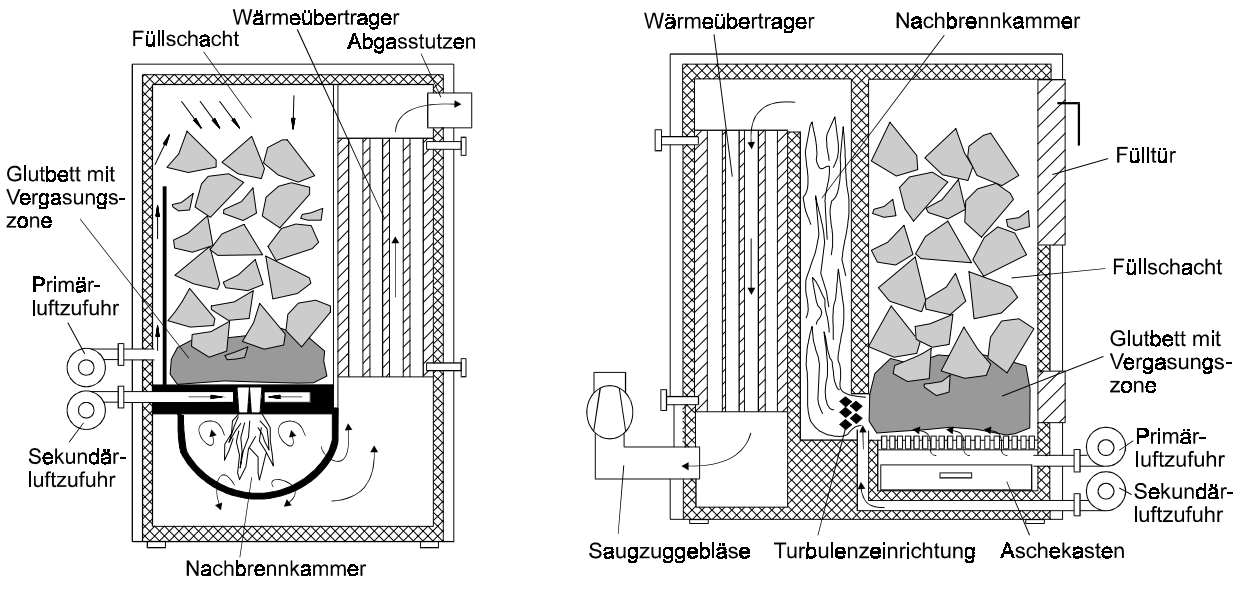


Abb. 6.10: Stückholzkessel mit Sturzbrand (links) und seitlichem Unterbrand (rechts) /6-24/

6.1.4.1 Funktionsweise

Als Feuerungsprinzip für handbeschickte Zentralheizungskessel kommt heute fast ausschließlich der untere Abbrand zum Einsatz (sogenannte Unterbrandfeuerungen; vgl. Abb. 6.1) /6-34/. In einen Füllschacht wird meist stückiges Holz in Form von Scheiten oder seltener auch grobes Holzhackgut eingefüllt (Abb. 6.10). Bei einer üblichen Nennwärmeleistung von 20 bis 40 kW beträgt die typische Einfüllmenge ca. 30 bis 50 kg Brennstoff je Auflage /6-24/. Ein Beispiel für einen ausgeführten Scheitholz-Zentralheizungskessel bietet Abb. 6.11.

Die Verbrennungsluft wird über Saugzug- oder (seltener) durch Druckgebläse zugeführt, so dass die Anlagen entweder mit Unter- oder Überdruck im Feuerraum betrieben werden. Ausschließliche Naturzuganlagen sind heute dagegen weniger häufig. Der Betrieb mit einem Gebläse bietet den Vorteil, dass die Feuerung weitgehend unabhängig von den Umgebungsbedingungen (d. h. Zugbedingungen im Kamin) betrieben werden kann. Außerdem lässt sich dadurch ein größerer Druckverlust im Feuerraum überwinden; derartige Druckverluste sind notwendig, wenn zur Erzielung einer guten Vermischung von Verbrennungsluft und brennbaren Gasen entsprechende Verwirbelungen durch Verjüngungen oder Umlenkungen erreicht werden sollen. Neben den thermostatisch geregelten Anlagen, bei denen die vom Kessel produzierte Wärmemenge nach der Kesselwassertemperatur an die Nachfrage angepasst wird (Leistungsregelung), werden heute zunehmend abgasgeführte Verbrennungsluftregelungen verwendet, bei denen der Abgaszustand durch Sensoren überwacht wird, um so eine für die Verbrennungsluftzufuhr geeignete zusätzliche Regelgröße (z. B. Luftüberschusszahl, CO, C_nH_m) zu erhalten (Kapitel 6.1.4.3). Derartige abgasgeführte Verbrennungsluftregelungen führen auch zu Wirkungsgradverbesserungen /6-16/ /6-33/, so dass Stückholzkessel heute Wirkungsgrade von über 90 % erzielen (Kapitel 7.1).

Mit Scheitholzkesseln sind auch Teillastbetriebszustände bis mindestens 50 % möglich; allerdings ist auch dann der Einsatz eines Wärmespeichers sinnvoll. Dieser gleicht die Schwankungen zwischen Wärmenachfrage und Wärmeangebot aus (Kapitel 6.1.4.3). Stückholzkessel werden in der Praxis gelegentlich auch mit automatisch beschickten Voröfen kombiniert; hier übernimmt der Kessel die Funktion der Nachverbrennung und des Wärmeübertragers (Kapitel 6.2.2).

Sicherheitstechnische Funktionen. Die wichtigsten sicherheitstechnischen Funktionen bei handbeschickten Feuerungen umfassen das kontrollierte Öffnen des Beschickungsraums zur Verhinderung austretender Gase (z. B. durch Kontaktschalter mit Ansteuerung des Abgasventilators) sowie bei geschlossenen hydraulischen Systemen eine thermische Ablaufsicherung des Kessels. Hierbei handelt es sich um eine mechanische Vorrichtung, durch die Kaltwasser (meist Trinkwasser) über einen Sicherheitswärmeübertrager geleitet wird. Bei Überhitzung, die durch das Erreichen einer bestimmten Vorlauftemperatur angezeigt wird, öffnet sich ein Ventil, welches den Kaltwasserdurchfluss freigibt, so dass die überschüssige Wärme in das Abwassersystem abgeleitet werden kann.

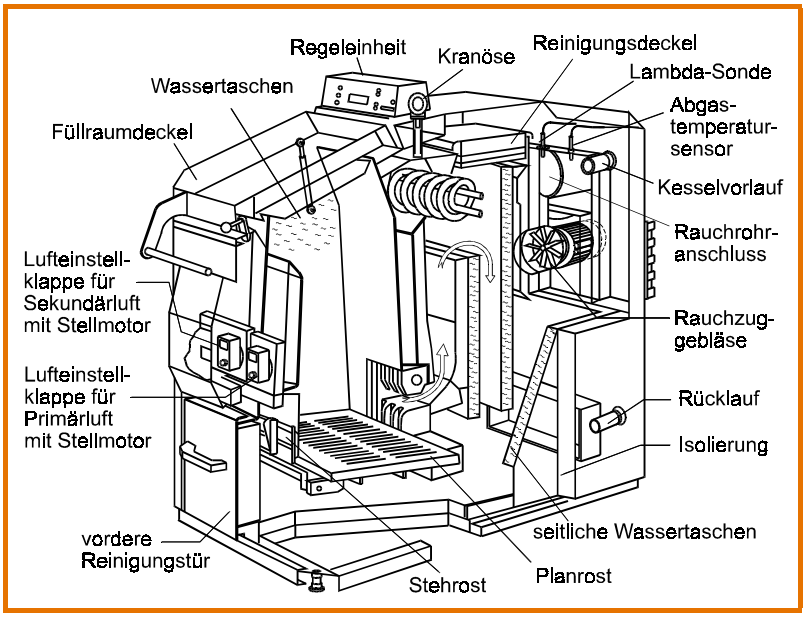


Abb. 6.11: Beispiel für einen Scheitholzzentralheizungskessel nach dem Prinzip des seitlichen Unterbrands und Beschickung von oben (nach HDG /6-53/)

6.1.4.2 Einsatzbereiche, Varianten und Ausstattung

Bei den Scheitholzkesseln handelt es sich um eine besonders variantenreiche Bauartengruppe, deren Merkmale und Ausführungen nachfolgend vorgestellt werden. Eine ausführlichere Beschreibung der wichtigsten Scheitholzöfen und Kesseltypen findet sich bei STREHLER /6-53/. Die am Markt aktuell angebotenen Feuerungstypen von Scheitholzkesseln werden außerdem bei UTH

Merkmale moderner Scheitholzkessel:

- Niedrige Schadstoffemissionen bei Nennwärmeleistung:
  - Kohlenmonoxid: < 500 mg/Nm^3 bei 13 % Bezugs-O_2
  - Staub: <50 mg/Nm^3 bei 13 % Bezugs-O_2
- hoher Kesselwirkungsgrad: > 80 %
- einfache Wärmetauscherreinigung über Einhebelmechanik oder automatisch
- abgasgeführte Verbrennungsluftregelung
- Lastvariabilität im Bereich von ca. 50 bis 100 %
- einfache Entaschung ca. alle 2 bis 4 Wochen

/6-55/ zusammengestellt. Eine Übersicht findet sich auch im Anhang D.

Einsatzbereiche. Handbeschickte Stückholzkessel werden im Nennwärmeleistungsbereich von 10 bis 800 kW angeboten, ihr Haupteinsatzbereich liegt aber bei Leistungen bis 50 kW. Auf Grund der zunehmenden Bedeutung von Niedrigenergiehäusern werden in jüngster Zeit auch Anlagen mit weniger als 15 kW Nennwärmeleistung angeboten, derartige Anlagen unterliegen dann auch nicht der einmaligen Messpflicht bei der Inbetriebnahme gemäß 1.BImSchV (vgl. hierzu Kapitel 8.5.3).

In den häuslichen Kesseln wird überwiegend Scheitholz verwendet, während in Anlagen über 50 kW teilweise auch eigene Holzverarbeitungsabfälle einschließlich gestrichener, lackierter oder beschichteter Hölzer sowie Sperrholz, Spanplatten, Faserplatten oder verleimtem Holz eingesetzt werden dürfen (vgl. Kapitel 8.4). Größere Anlagenleistungen mit ca. 250 kW werden daher in der gewerblichen Holzbe- und -verarbeitung zur Verbrennung grobstückiger Industrierestholz-Brennstoffe eingesetzt. Seltener kommen auch Leistungen bis 800 kW vor, wobei auch bei solchen großen Anlagen das Prinzip des unteren Abbrands verwirklicht wird. Allerdings sind hier mechanische Hilfsmittel für die Beschickung sinnvoll (Schubkarre, Traktor).

Beschickung. Kleinere Kessel werden seitlich über schwenkbare Fülltüren oder über einen Füllschachtdeckel von oben beschickt. Die seitliche Befüllung wird vom Bediener häufig als angenehmer empfunden. Hierbei besteht auch nur ein geringeres Risiko, dass Schwelgase über die relativ kleine geöffnete Tür in den Aufstellraum austreten. Allerdings ist das Füllvolumen bei gleicher Bauhöhe in der Regel geringer als bei Feuerungen mit Oben-Beschickung. Deshalb wird bei größeren Anlagenleistungen und bei Meterscheit-Kesseln ausschließlich die Beschickung von oben verwendet. Dem Schwelgasaustritt beim Öffnen des Fülldeckels wird dabei in der Regel durch eine Sicherheitsschaltung begegnet, die zugleich den Abgasventilator ansteuert, um den Unterdruck im Füllraum zu erhöhen.

Bei Scheitholzkesseln mit Oben-Beschickung werden häufig auch Füllschachtaufsätze angeboten, durch die das Brennstoff-Füllvolumen des Kessels um 50 bis 100 % erhöht werden kann. Entsprechend verlängert sich auch die Brenndauer, allerdings wird das Einschichten der Scheite beschwerlicher.

Bei Meterscheit-Kesseln ist der Arbeitsaufwand für die Zerkleinerung des Holzes am geringsten. Diese Kessel werden ab 45 kW Nennwärmeleistung von vielen Herstellern angeboten. Feuerungen, in denen das Scheitholz vor der Verbrennung erst noch zerkleinert wird, kommen dagegen relativ selten vor. Bei derartigen Feuerungen, die den Übergangsbereich zu den automatisch beschickten Feuerungen darstellen, wird der Arbeitsaufwand zur Kesselbeschickung dadurch verringert, dass das Scheitholz beispielsweise mechanisch aus einem großen Vorratsbehälter dem Arbeitsbereich eines hydraulischen Stanzzylinders zugeführt wird, der das stückige Holz durch eine Matrize presst, es dabei stark zerkleinert und automatisch in den nachgeschalteten Kessel weiterfördert (ab ca. 25 kW) /6-29/. Andere Systeme verwenden unmittelbar vor der Verbrennung einen langsam laufenden Zerspaner (Kapitel 3.3.3.2) mit anschließender automatischer Beschickung des zerkleinerten Brennstoffs.

Gebläse. Mit Ausnahme der Naturzugfeuerungen verwenden alle Scheitholzkessel heutiger Bauart Gebläse. Dadurch kann die Feuerung unabhängig vom Kaminzug geregelt und mit Verbrennungsluft versorgt werden.

Es werden Druck- und Saugzuggebläse unterschieden. Druckgebläse erzeugen einen Überdruck im Feuerraum und sind in der Regel an der Frontseite der Anlage montiert. Das Saugzuggebläse ist dagegen am Rauchrohrabgang angebracht, wo es in der Anlage einen Unterdruck erzeugt. Es bietet Vorteile beim Nachlegen von Brennstoff, da ein Austritt von Schwelgasen beim Öffnen der Fülltür nicht durch eine aufwändige Sicherheitsvorrichtung vermieden werden muss. Statt dessen wird beim Öffnen der Fülltür lediglich die Drehzahl des Gebläses erhöht, um die Schwelgase abzusaugen. Gelegentlich wird das Gebläse dazu mit einer zusätzlichen Absaugöffnung über der Fülltür verbunden, oder der Primärluftkanal schließt automatisch, damit die eingesaugte Luft nur

über die geöffnete Fülltür eintreten kann. Bei Feuerungen mit Druckgebläse ist beim Nachlegen dagegen ein Abschalten des Gebläses erforderlich, gleichzeitig öffnet sich ein Bypass zum Abgasrohr, durch den der Überdruck entweichen kann.

Für Standorte ohne Anbindung an das öffentliche Stromnetz (z. B. Berghütten) werden Naturzugfeuerungen ohne Gebläse eingesetzt. Auch diese Feuerungen wurden in der Vergangenheit optimiert und durch spezielle Anordnung der Wärmetauscher in ihrem Zugverlust gemindert, so dass bei richtig dimensioniertem Schornstein auch hiermit ein hoher Kesselwirkungsgrad um ca. 90 % möglich ist /6-55/.

Wärmeübertrager. Die Wärmeübertragung ist bei Kleinanlagen in der Regel als sogenannter Rauchrohrkessel ausgeführt, das heißt die Abgase werden durch Rauchrohre geleitet, die vom Wärmeträgermedium (Wasser) umspült sind. Außerdem kommen Plattenwärmetauscher zum Einsatz. In Scheitholzkesseln sind die Wärmeübertrager meist ein- oder zweizügig mit vertikalem Abgasverlauf ausgeführt. Die senkrechte Bauweise benötigt zwar mehr Platz, ist aber wegen der leichteren Reinigung sinnvoll, da der abgelöste oder abgebürstete Staub in den darunter liegenden Aschekasten fallen kann.

In die Rauchrohre werden häufig Spiralen eingehängt (sogenannte „Turbulatoren“). Hierbei handelt es sich um Rauchgasschikanen, durch die die Gasverweilzeit im Rauchrohr konstanter ist und die Ausprägung heißer Strähnen im Kernstrom des Abgasweges verhindert wird. Dies führt letztlich zu einem verbesserten Wirkungsgrad.

Da die Turbulatoren beweglich sind, dienen sie meist auch der Reinigung, indem sie von Zeit zu Zeit – z. B. über einen gemeinsamen Hebel oder auch automatisch – auf und ab bewegt werden und dadurch Staubablagerungen entfernen. Bei Fehlen solcher Turbulatoren erfolgt die Reinigung von Hand. Hierzu muss der Wärmeübertrager möglichst leicht zugänglich sein. Das entsprechende Reinigungswerkzeug ist in der Regel im Lieferumfang einer Kompaktanlage enthalten.

6.1.4.3 Regelung

Die Regelung von Stückholzfeuerungen muss dem besonderen Verbrennungsablauf des Chargenabbrands Rechnung tragen. Dieser weist für jede Charge drei signifikante Phasen auf, die Anfahrphase, die stationäre (betriebswarme) Phase mit annähernd konstanter Leistung und die Ausbrandphase (vgl. Kapitel 5.4, Abb. 5.2). In der Anfahrphase ist die gewünschte Betriebstemperatur noch nicht erreicht, so dass es zu erhöhten Emissionen an unverbrannten Stoffen (u. a. Kohlenwasserstoffe, Kohlenstoffmonoxid) kommen kann. In der stationären Phase ist die Betriebstemperatur erreicht, und es kommt bei geeigneter Zuführung der Verbrennungsluft zu einem guten Ausbrand der biogenen Festbrennstoffe. Durch Störungen sind aber auch hier ungünstige Verbrennungsbedingungen möglich; eine Brücken- oder Kanalbildung im Brennstoffschacht kann beispielsweise zu vorübergehender oder länger andauernder Verminderung der Feuerungsleistung und der Verbrennungstemperatur führen. Im Ausbrand wird schließlich die am Ende des Abbrandes zurückbleibende Holzkohle umgesetzt. Da in dieser Phase die Feuerungsleistung und Verbrennungstemperatur ebenfalls absinken, können die Emissionen unverbrannter Gase wiederum ansteigen. Im Gegensatz zur Anfahrphase ist während der Ausbrandphase meist nur ein Anstieg des Kohlenmonoxidgehalts aus der Holzkohlevergasung festzustellen; dabei bleiben die Kohlenwasserstoffemissionen gering, da kaum noch flüchtige Holzkomponenten vorhanden sind.

Bei handbeschickten Zentralheizungsanlagen scheidet die Brennstoffzufuhr als Stellgröße für die Leistungs- und Verbrennungsregelung weitgehend aus. Statt dessen kommt hierfür die Primär- und Sekundärluftmenge in Frage, sofern eine Trennung zwischen diesen beiden Luftströmen besteht. Mit der Primärluft kann die Entgasungsrate und damit die Feuerungsleistung in einem Bereich von ca. 50 bis 100 % beeinflusst werden, während mit der Sekundärluft der vollständige Ausbrand der brennbaren Gase kontrolliert wird. Die wichtigsten Regelkonzepte bei handbeschickten Holzfeuerungen verfolgen im Wesentlichen folgende Ziele :

- Beeinflussung der Feuerungsleistung, in der Regel zur Erzielung langer Abbrandzeiten,
- Optimieren der Verbrennungsbedingungen während der drei Abbrandphasen,
- Integrierte Speicherbewirtschaftung mit Restwärmenutzung (Kapitel 6.1.4.3).

Je nach Regelbarkeit und Regelungsart unterscheidet man Volllastkessel, leistungsgeregelte Kessel und Kessel mit einer kombinierten Leistungs- und Verbrennungsregelung.

Volllastkessel. Diese Scheitholzkessel lassen sich nicht in ihrer Leistung drosseln, da sie kein Gebläse besitzen. Statt dessen hängt die Wärmeabgabe hauptsächlich von der zugeführten Luftmenge ab, die sich

aus dem natürlichen Kaminzug und den entsprechenden Klappenstellungen für die Primär- und Sekundärluftöffnungen ergibt. Derartige Kessel werden daher auch als Naturzugkessel bezeichnet. Sie sind ausschließlich bei Nennwärmeleistung zu betreiben. Da aber der Wärmebedarf während eines Jahres nur selten in Höhe der Nennwärmeleistung liegt, muss die überschüssige Wärme in einem Pufferspeicher zwischengespeichert werden (Kapitel 6.1.4.3).

Leistungsgeregelte Kessel. Diese Kessel verfügen über ein Saugzug- oder Druckgebläse, welches es ermöglicht, die zugeführte Primärluftmenge je nach Leistungsbedarf gezielt zu dosieren. Das geschieht entweder über die Gebläsedrehzahl oder über eine entsprechende Klappenstellung in den Zuluftkanälen. Als Regelgröße dient meist die Differenz zwischen dem Istwert und dem Sollwert der Kesseltemperatur. Auch leistungsgeregelte Scheitholzkessel sollten möglichst bei Nennwärmeleistung betrieben werden, da es sich hierbei um den verbrennungstechnisch günstigsten Betriebszustand mit den geringsten Schadstoffemissionen handelt (vgl. Kapitel 7.2). Daher kann auch hier auf einen Wärmespeicher nicht verzichtet werden (Kapitel 6.1.4.3). Je nach Ladezustand des Speichers, der durch Temperaturfühler erfasst wird, wird die Feuerungsleistung des Holzkessels von der Regelung angepasst (vgl. Kapitel 6.1.4.3). Die mögliche dauerhafte Lastdrosselung (bei Scheitholzkesseln auf ca. 50 % der Nennwärmeleistung) ist allerdings deutlich geringer als bei automatisch beschickten Feuerungen (auf ca. 30 % der Nennwärmeleistung).

Kombinierte Leistungs-/Verbrennungsregelung. Bei derartigen Kesseln wird zusätzlich zur Kesselleistung auch die Qualität der Verbrennung geregelt. Im einfachsten Fall wird hierzu die Abgastemperatur als weitere Regelgröße verwendet, indem entsprechend dem Abbrandfortschritt die Verbrennungsluftmenge oder das Verhältnis von Primär- und Sekundärluft angepasst wird. Bei aufwändigeren Regelkonzepten werden auch Verbrennungstemperatursensoren, Lambda-Sonden oder CO-Sensoren verwendet (vgl. Kapitel 6.2.4), wobei entweder die Primär- und Sekundärluftmenge getrennt oder die Primärluftmenge und die Drehzahl des Abgasventilators beeinflusst werden /6-16/.

6.1.4.4 Wärmespeicher

Um eine hohe Verbrennungsqualität zu erreichen, sollten handbeschickte Feststoff-Feuerungen mit möglichst hoher Heizlast betrieben werden. Die maximale Auslastung wird aber im Allgemeinen nur während weniger Heiztage im Jahr benötigt. Daher sind verschiedene Maßnahmen erforderlich, durch die eine sinnvolle Anpassung an den jeweiligen Energiebedarf erfolgen kann. Hierzu zählen im Wesentlichen:

- die Auswahl einer Heizanlage mit ausreichender Leistungsanpassung (Lastvariabilität, vgl. Kapitel 6.1.4.3),
- der Einsatz der Holzfeuerung in Kombination mit anderen Wärmeerzeugern (vgl. Kapitel 6.1.4.5) und
- die Verwendung eines Wärmespeichers („Pufferspeicher“).

Funktionsweise und Anwendung des Wärmespeichers werden nachfolgend vorgestellt.

Funktionsweise. Sobald die Wärmenachfrage unter die niedrigste im Dauerbetrieb erzielbare Leistung eines Heizkessels fällt („kleinste Wärmeleistung“), muss die Feuerung entweder durch Unterbrechen der Luft- und Brennstoffzufuhr selbsttätig abschalten, oder die überschüssige Energiemenge wird in einen Wärmespeicher („Pufferspeicher“) eingespeist (Ansonsten steigt die Kesselwassertemperatur so lange weiter an, bis die Sicherheitseinrichtung des Kessels aktiv wird).

Bei dem Wärmespeicher handelt es sich um einen wärmeisolierten Stahlbehälter, der während der Speicherbeladung und -entnahme vom zirkulierenden Wärmeträgermedium (hauptsächlich Wasser) durchflossen wird. Der heiße Zulauf im oberen Bereich des Speichers ist so gestaltet, dass Turbulenzen möglichst vermieden werden und sich eine gleichmäßige ungestörte Temperaturschichtung einstellt. Das geschieht entweder durch Verwendung von Pralltellereinläufen (bei vertikalem Anschluss) oder durch sanftes Anströmen der Speicherdecke (bei seitlichem Anschluss). Hohe Kesselvorlauftemperaturen begünstigen die Temperaturschichtung und die Speicherkapazität. Für die Entnahme der Speicherwärme wird entweder die Flussrichtung umgekehrt, oder es werden separate Entnahme- und Rücklaufleitungen verwendet.

Speichertypen. Je nachdem, ob die Brauchwassererwärmung separat oder im Wärmespeicher integriert ist oder ob es sich um eine Mehrfachnutzung mit Solarwärmeeinspeisung handelt, werden unterschiedliche Speichertypen angeboten. Deren prinzipieller Aufbau ist in Abb. 6.12 dargestellt. Wenn es sich um einen Kombispeicher, d. h. um einen Speicher mit integriertem Brauchwasservorrat handelt, ist das effektive Wärmespeichervermögen für den Heizwärme-

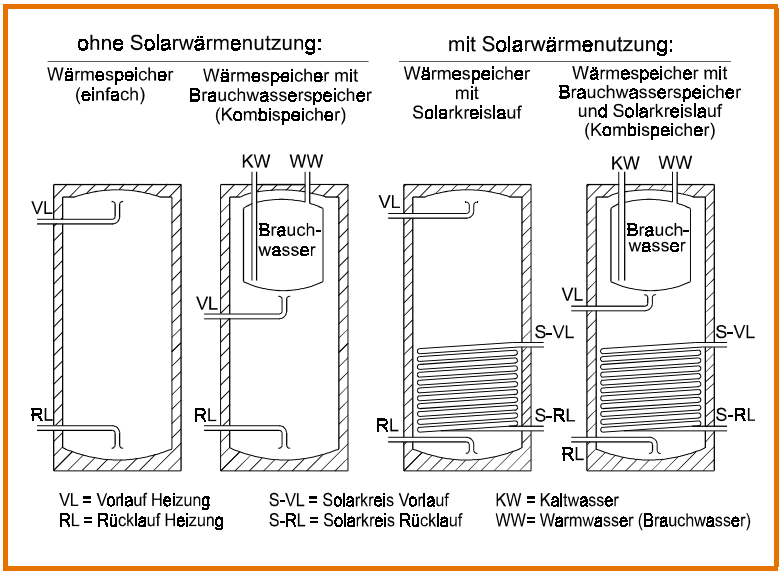


Abb. 6.12: Varianten von Wärmespeichern mit und ohne Brauchwasserspeicher bzw. Solarwärmeeinspeisung

kreislauf um den Brauchwasserinhalt vermindert. Auch bei Verwendung eines eingebauten Elektroheizstabs (z. B. für den Sommerbetrieb) entstehen hohe Wärmeverluste an dem Wärmespeicher, der ja nur durch ein wärmedurchlässiges Blech vom Brauchwasser getrennt ist. Allerdings ist der Aufwand für die Installation geringer. Für besonders schwer zugängliche Räume (z. B. Kellerräume) werden auch zerlegbare Wärmespeicher eingesetzt, die erst am Aufstellort errichtet werden /6-27/. Die regelungstechnische Einbindung von Wärme- und Brauchwasserspeichern einschließlich Solaranlage kann über vorgefertigte Systeme erfolgen, die häufig von den Kesselherstellern mit den entsprechenden Schnittstellen angeboten werden.

Hydraulische Einbindung. Ein typisches (einfaches) Schema für die Funktionsweise und die hydraulische Einbindung des Wärmespeichers in die häusliche Energieversorgung gibt Abb. 6.13. Während des Anheizens ist der Heizungsvorlauf mit dem -rücklauf kurzgeschlossen (Ventile B offen, A geschlossen), um die erforderliche Betriebstemperatur (meist ca. 60 °C am Kesselrücklauf) möglichst rasch zu erreichen („Rücklaufanhebung"). Sobald Ventil A öffnet, kann Heißwasser in den Heizkreislauf und in den Boiler fließen. Wird wenig oder keine Energie benötigt, beginnt die Speicherbeladung. Dazu reduziert die Heizkreispumpe den Durchfluss, so dass das überschüssige Fördervolumen der Speicherladepumpe in den Wärmespeicher abfließen muss. Sobald die Wärmelieferung aus dem Kessel zum Erliegen kommt (z. B. bei Absinken der Abgastemperatur unter 60 °C) schließen beide Ventile (Ventil A und B, Abb. 6.13). Indem die Speicherladepumpe nun ausgeschaltet ist, kann die Heizkreispumpe die Flussrichtung im Wärmespeicher umkehren und die Wärme aus dem oberen Speicherbereich entnehmen.

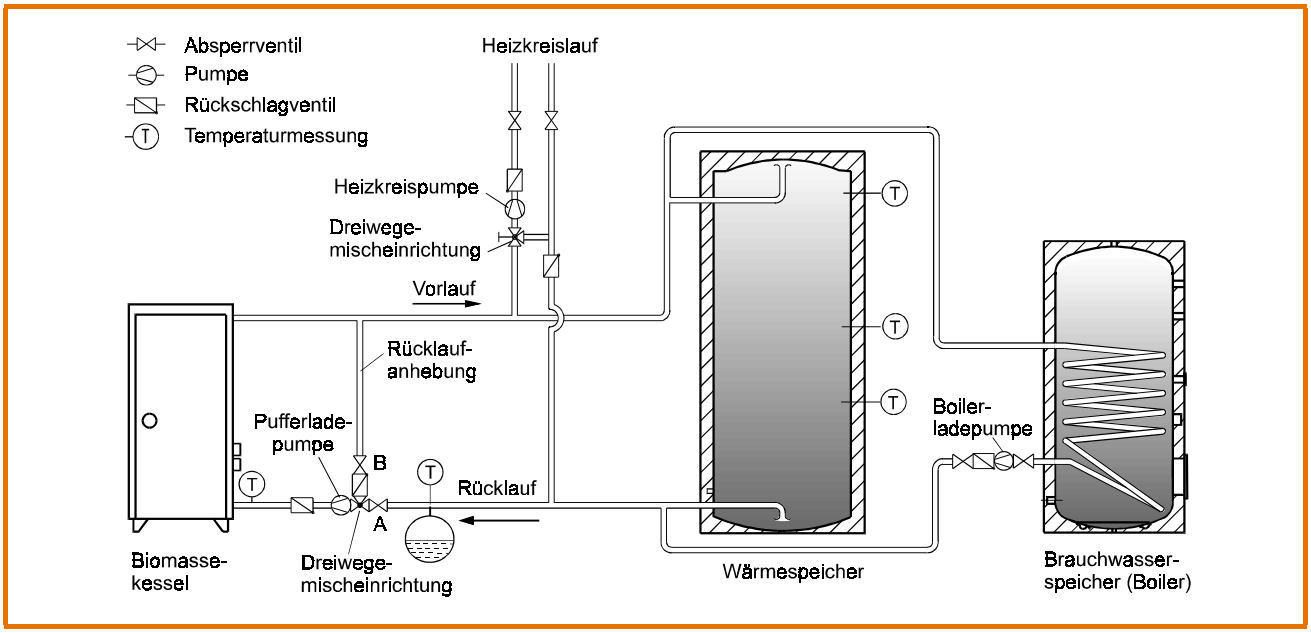


Abb. 6.13: Beispiel eines hydraulischen Anschlussschemas für einen Wärmespeicher in einem Holzheizsystem /6-24/

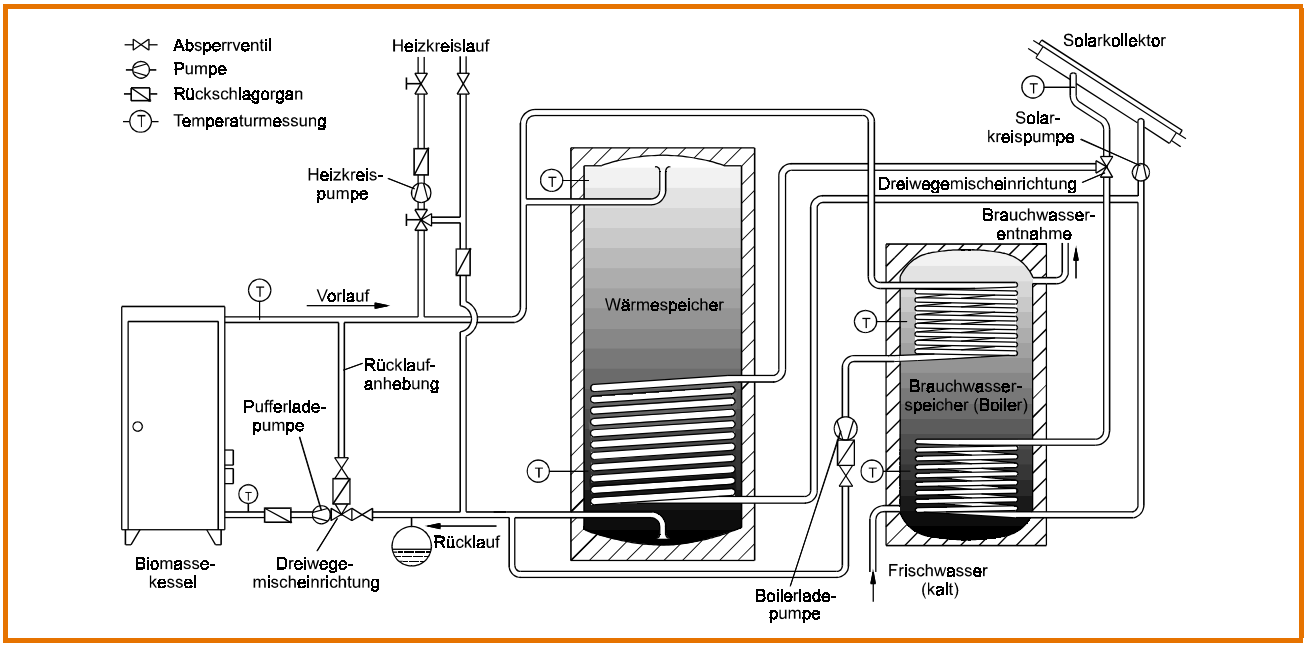


Abb. 6.14: Hydraulisches Anschlussschema für einen Wärmespeicher in einem kombinierten Holz-Solar-Heizsystem

Kombination mit Solarwärme. In jüngster Zeit werden Holzfeuerungen vermehrt mit solarthermischen Systemen für die Brauch- und Heizwassererwärmung kombiniert. In einem solchen Fall sind spezielle Wärmespeicher mit Zusatzwärmetauscher und Anschlussmöglichkeit an weitere Kreisläufe erforderlich Ein Beispiel für deren hydraulische Einbindung gibt Abb. 6.14.

Speicherdimensionierung. Das erforderliche Speichervolumen wird von mehreren Faktoren bestimmt. Hierzu zählen

- Leistungsbereich (lastvariabler oder ausschließlicher „Volllast-Kessel"),
- Volumen des Brennstoff-Füllraums,
- Nennwärmeleistung,
- wirksame Temperaturdifferenz im Speicher (die wiederum von der Auslegung des Heizungssystems abhängt) und
- Komfortansprüche.

Feuerungen, die hauptsächlich bei Nennwärmeleistung betrieben werden können, benötigen größere Wärmespeicher als lastvariable Feuerungen, bei denen der Wärmeüberschuss auf Grund der kesseleigenen Leistungsanpassung geringer ist. Größere Wärmespeicher sind notwendig, wenn die Anlagen (Unterbrandfeuerungen) einen relativ großen Brennstofffüllraum (Füllschacht) besitzen und somit je Brennstoffcharge eine hohe Wärmemenge produzieren. Neben der Füllschachtgröße kann auch die Nennwärmeleistung für die Speicherdimensionierung herangezogen werden. Bei handbeschickten Stückholzkesseln werden meist Speichervolumina von mindestens ca. 50 l je kW installierter Feuerungswärmeleistung empfohlen /6-55/, als Ziel sollte ein Wert von ca. 100 l je kW abgestrebt werden /6-51/. Das gilt auch für leistungsgeregelte (teillastfähige) Scheitholzkessel, die ebenfalls möglichst im Bereich der Nennwärmeleistung betrieben werden sollten, da es sich hierbei um den verbrennungstechnisch günstigsten Betriebszustand mit den niedrigsten Schadstoffemissionen handelt (vgl. Kapitel 7.2.2).

Große Speichervolumina erhöhen zudem den Betriebskomfort, da während eines vorübergehend andauernden Volllastbetriebs (z. B. tagsüber) ein größerer Wärmevorrat für den späteren Anlagenstillstand (z. B. nachts oder bei ausschließlicher Brauchwassernachfrage) angelegt werden kann. Speicher verursachen jedoch stets zusätzliche Wärmeverluste, die sich auf den Jahresnutzungsgrad auswirken. Sie sollten deshalb – wenn möglich – im beheizten Teil des Gebäudes untergebracht werden.

Wärmeinhalt des Speichers. Das Wärmespeichervermögen – und damit das erforderliche Speichervolumen – hängt von der wirksamen Temperaturdifferenz zwischen dem Speichervorlauf und dem Heizungsvorlauf (nach der Mischeinrichtung des Heizkreislaufs) ab (Abb. 6.13). Die Entladung des Wärmespeichers endet daher, sobald die Entnahme-

temperatur unter die Heizungsvorlauftemperatur sinkt. Die hierbei auftretende Temperaturdifferenz zwischen Speicher bei maximaler Beladung und Heizungsvorlauf liegt je nach Auslegung des Heizungssystems zwischen 25 und 50 Kelvin. Die nutzbare Kapazität des Wärmespeichers ist also abhängig von der Heizungsvorlauftemperatur und somit auch vom Heizungssystem. Bei Niedertemperaturheizungen (z. B. Fußboden- oder Wandstrahlerheizungen) kann demnach der Pufferspeicher relativ klein dimensioniert werden. Als Faustzahl gilt, dass bei 30 Kelvin wirksamer Speichertemperaturdifferenz und einem Speichervolumen von 100 l je kW Nennwärmeleistung ein Volllastbetrieb von 4 Stunden bzw. ein Halblastbetrieb von 8 Stunden ohne gleichzeitige Heizwärmeabnahme möglich ist.

6.1.4.5 Kombination mit anderen Wärmeerzeugern

Einige Scheitholzkessel lassen sich zusätzlich mit Heizöl oder Gas betreiben. Wenn dazu ein entsprechender Brenner vor die Holzeinfülltür angeflanscht oder eingeschwenkt werden muss, spricht man vom „Umstellbrandkessel“; ist der Brennstoffwechsel dagegen ohne Umbau möglich, spricht man von einem „Wechselbrandkessel“ /6-7/. In beiden Fällen handelt es sich um eine Feuerung mit gemeinsamem Feuerraum (Abb. 6.15, Typ A). Ein Sonderfall des Wechselbrandkessels ist der „Doppelbrandkessel“, der über zwei voneinander getrennte Feuerräume verfügt (Abb. 6.15, Typ B oder C).

In jüngster Zeit werden auch Kombinationen angeboten, die eine wahlweise Umstellung auf Pelletfeuerung ermöglichen (Kombikessel). Wie bei den Umstellbrandkesseln für Heizöl handelt es sich auch hier um Scheitholzanlagen mit angeflanschten Pelletfeuerungen. Dazu wird meist ein Blinddeckel zum Feuerraum entfernt, der Pelletbrenner seitlich angeflanscht und die Regelung umgestellt. Hierzu ist ein Zeitaufwand von wenigen Minuten bis zu einer Viertelstunde erforderlich.

Wie bei einer Scheitholz/Heizölkombination kann die Umstellung auf Pellets aber auch automatisch erfolgen. In diesem Fall werden zwei eigenständige Feuerungen mit einem gemeinsamen Wärmetauscher verwendet (Abb. 6.15, Typ B), so dass eine Vergleichbarkeit mit dem oben genannten Doppelbrandkessel besteht.

Die Vorteile solcher Kombinationen bestehen darin, dass die für Scheitholzkessel ungünstigen Phasen niedriger oder wechselnder Wärmenachfrage überbrückt werden können. Häufig kann damit auch

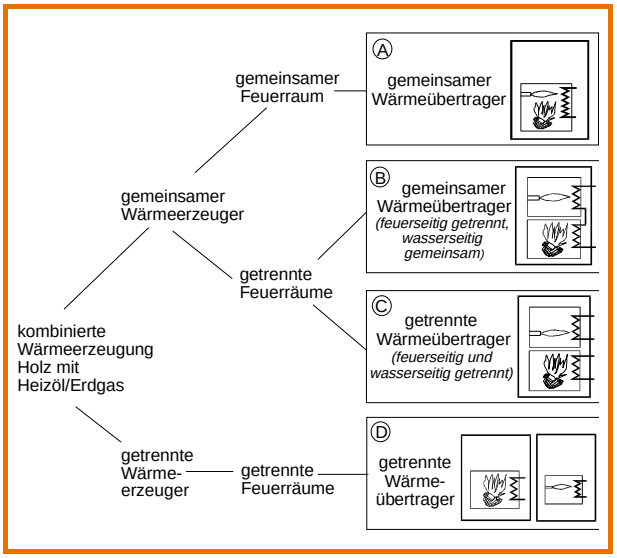


Abb. 6.15: Kombinierter Einsatz von Heizöl- bzw. Erdgasbrennern mit Scheitholzfeuerungen (nach /6-21/)

zeitweise ein unbetreuter Heizbetrieb realisiert werden. Meist werden solche Kombinationen bei Kleinanlagen nicht für den parallelen Betrieb (d. h. gleichzeitiger Betrieb, z. B. zur Spitzenlastabdeckung), sondern für eine alternative Betriebsweise ausgelegt (vgl. hierzu auch Kapitel 6.2.1.4). Hierfür existieren unterschiedliche Systemlösungen (Abb. 6.15).

Häufig werden zwei selbständig arbeitende getrennte Wärmeerzeuger mit getrennten Feuerräumen und getrennten Wärmeübertragern verwendet. Bei Anlagen in Blockbauweise mit feuerseitig und wasserseitig getrennten Wärmeübertragern lassen sich dagegen die Abstrahlungsverluste der einzelnen Kesselbauteile verringern. Allerdings ist das Verhältnis der jeweiligen Teilleistungen beider Feuerungen zueinander nicht variierbar. Werden Blockbauweisen mit feuerseitig getrennten und wasserseitig gemeinsamen Wärmeübertragern verwendet, können die Strahlungs- und Bereitschaftsverluste nochmals reduziert werden, indem der Feuerraum der Holzseite bereits erwärmt wird, bevor der Holzfeuerungsbetrieb einsetzt (Abb. 6.15, Typ B). Dadurch kann in manchen Fällen die Warmlaufphase der Holzfeuerung beschleunigt werden.

Für den gleichzeitigen Betrieb zweier getrennter Feuerungen sind auch zwei getrennte Schornsteinzüge erforderlich (vgl. Kapitel 8.2.3). Bei Kesseln mit gemeinsamem Feuerraum und gemeinsamem Wärmeübertrager ist dagegen aus Sicherheitsgründen in der Regel nur ein alternativer Betrieb möglich („Wechselbrandkessel“). Die integrierte Öl-/Gasfeuerung kann jedoch zum Vorheizen des Feuerraums verwendet werden.

6.2 Automatisch beschickte Feuerungen

6.2.1 Bauarten und Feuerungstypen

Generell werden automatisch beschickte Feuerungsanlagen in Festbett-, Wirbelschicht- und Flugstromreaktoren unterschieden /6-40/. Bei Kleinanlagen im Leistungsbereich bis ca. 100 kW Nennwärmeleistung kommen allerdings nur die Festbettfeuerungen vor.

Aber auch bei diesen Festbettfeuerungen werden sehr unterschiedliche Feuerungsprinzipien eingesetzt, die zum Teil für die jeweiligen Brennstoffarten optimiert wurden. Daher sind die Brennstoffe häufig nicht gegeneinander austauschbar. Beispielsweise sind Hackschnitzelfeuerungen zwar grundsätzlich auch für die Verbrennung von Holzpellets geeignet, umgekehrt ist dies jedoch nicht der Fall. Auch bei den Halmgutfeuerungen gilt in der Regel, dass diese auch für Hackschnitzel geeignet sind (zumindest bei Schüttgutfeuerungen), umgekehrt ist dies jedoch ebenfalls nicht der Fall.

Einen Überblick über die Feuerungsprinzipien von Kleinfeuerungen und die hierin einsetzbaren Brennstoffe gibt Tabelle 6.3. Bei den nachfolgenden Erläuterungen werden zunächst die vornehmlich für Holzbrennstoffe geeigneten Unterschub- und Quereinschubfeuerungen sowie die speziell für Pellets entwickelten Abwurffeuerungen separat vorgestellt. Den Besonderheiten der Halmgutverbrennung wird in einem eigenen Kapitel Rechnung getragen (Kapitel 6.2.1.4). Eine Übersicht über die anbietenden Hersteller bietet Anhang D. Umwelt- und Kostenaspekte werden in Kapitel 7 bzw. 9 angesprochen.

6.2.1.1 Unterschubfeuerungen

Bei einer Unterschubfeuerung (Tabelle 6.3) wird der Brennstoff mit einer Förderschnecke von unten in die Feuermulde (Retorte) eingeschoben. Ein Teil der Verbrennungsluft wird als Primärluft in die Retorte eingeblasen. Dort erfolgen die Trocknung, pyrolytische Zersetzung und Vergasung des Brennstoffs sowie der Abbrand der Holzkohle. Um die brennbaren Gase vollständig zu oxidieren, wird die Sekundärluft vor dem Eintritt in die heiße Nachbrennkammer mit den brennbaren Gasen vermischt. Anschließend geben die heißen Gase im Wärmeübertrager ihre Wärme ab und gelangen durch das Kaminsystem in die Atmosphäre.

In Unterschubfeuerungen können Holzschnitzel mit einem Wassergehalt von 5 bis maximal 50 % verfeuert werden. Feuerraum und Nachbrennkammer müssen dabei an die Brennstoffqualität – insbesondere an den Brennstoff-Wassergehalt – angepasst sein, um technische Störungen zu vermeiden. Beispielsweise würde eine Anlage für waldfrische Hackschnitzel (50 % Wassergehalt) beim Verbrennen von trockenem Holz eine zu hohe Feuerraumtemperatur erreichen, was zu Materialproblemen und zur Schlackebildung führen kann.

Unterschubfeuerungen eignen sich für aschearme Brennstoffe, die wegen der Schneckenbeschickung eine feinkörnige und gleichmäßige Beschaffenheit aufweisen müssen. Die Verbrennung von Rinde oder Halmgutbrennstoffen scheidet daher aus. Das Prinzip der Unterschubfeuerung wird zunehmend auch für die Verbrennung von Holzpellets verwendet (z. B. in Pellet-Zentralheizungskesseln).

6.2.1.2 Quereinschubfeuerungen

Bei diesen Bauarten wird der Brennstoff von der Seite in den Feuerraum, der mit oder ohne Rost ausgestattet ist, eingebracht (Tabelle 6.3). Holzhackschnitzel mit kleinen Kantenlängen und relativ gleichbleibender Korngröße werden überwiegend mit Hilfe von Schnecken in die Feuerung eingebracht; grobkörnige ungleichmäßige Brennstoffe (z. B. zerspantes oder ungesiebtes Schredderholz, Rinde) können aber auch durch Kolben beschickt werden /6-40/.

Bei den Rostfeuerungen überwiegen die starren Rostsysteme. Abb. 6.16 zeigt ein Beispiel für eine der-

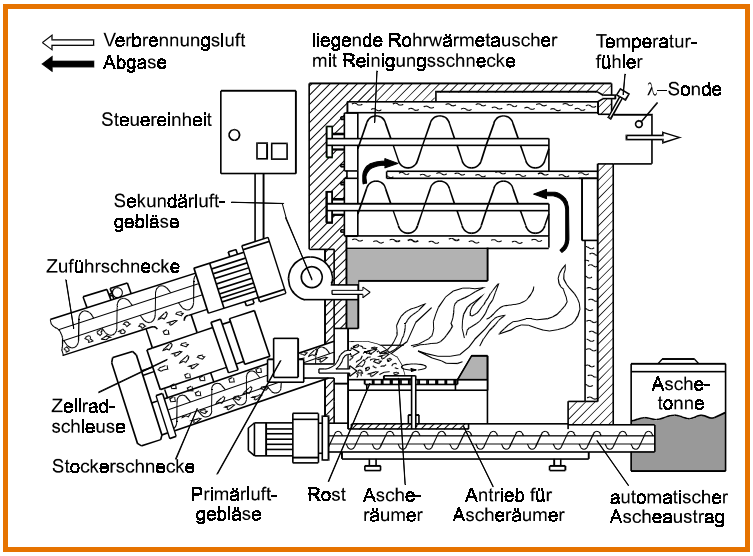
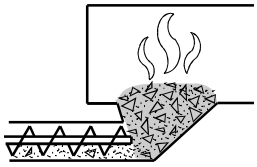
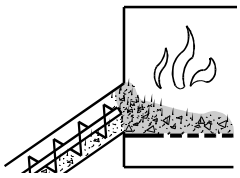
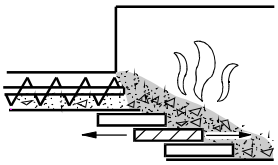
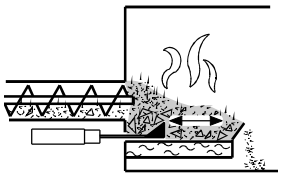
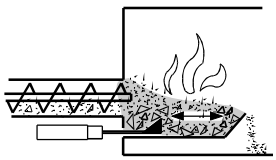
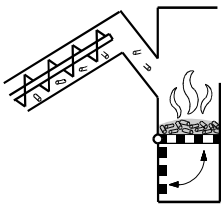
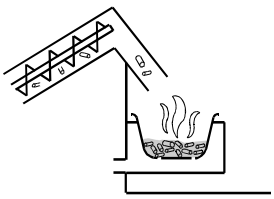
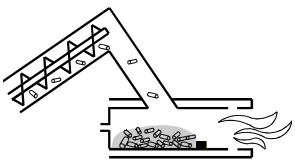


Abb. 6.16: Beispiel für eine 50-kW-Hackschnitzelfeuerung nach dem Quereinschubprinzip mit Rost und Ascheräumer (nach Heizomat /6-26/)

Tabelle 6.3: Systematik der Feuerungsprinzipien automatisch beschickter Kleinanlagen (vereinfachte schematische Darstellungen ohne Luftführung und Ascheaustrag)

Prinzip	Variante	Typ	Schema	Nennwärmeleistung[a]	Brennstoffe
Unterschubfeuerung				ab 10 kW (bis 2,5 MW)	Holzhackschnitzel, Holzpellets
Quereinschubfeuerung (mit Schnecken oder Kolben)	als Rostfeuerung	starrer Rost (z. T. mit Ascheräumer oder Kipprost)		ab 35 kW	Holzhackschnitzel, Holzpellets
		bewegter Rost (Vorschubrost)		ab 100 kW[b] (bis >20 MW)	Holzhackschnitzel, Holzpellets, Späne, Rinde
	als Schubbodenfeuerung (ohne Rost)	mit Wasserkühlung unter dem Glutbett (z. T. manuelle Entaschung, kein Schieber)		ab 25 kW (bis 800 kW)	Hackschnitzel, Holzpellets (ab 15 kW) Halmgut Körner
		ohne Wasserkühlung unter dem Glutbett		ab 25 kW (bis 180 kW)	Holzhackschnitzel Holzpellets (ab 15 kW)
Abwurffeuerung	mit Rost	Kipprostfeuerung		ab 15 kW (bis 30 kW)	Holzpellets, evtl. Präzisionshackgut
	ohne Rost	Schalenbrenner		ab 6 kW (bis 30 kW)	Holzpellets, evtl. Präzisionshackgut
		Tunnelbrenner		ab 10 kW	Holzpellets

a. Im Teillastbetrieb sind deutlich geringere Dauerleistungen von nur noch ca. 30 % möglich.
b. Das Vorschubrostprinzip wird in reinen Pelletfeuerungen bereits ab 15 kW Nennwärmeleistung eingesetzt.

artige Anlage. Erst im Leistungsbereich über 100 kW kommen auch bewegte Vorschubroste zum Einsatz (in seltenen Fällen werden bewegte Rostelemente auch in reinen Holz-Pelletfeuerungen bereits ab 15 kW verwendet). Beim Vorschubrost wandert der Brennstoff durch Vor- und Rückwärtsbewegungen der einzelnen Rostelemente auf dem Schrägrost nach unten.

Ähnlich wie die Unterschubfeuerung funktioniert auch die rostlose Schubbodenfeuerung (auch „Einschubfeuerung“). Wenn sie über eine wassergekühlte Brennmulde verfügt (vgl. hierzu Abb. 6.20) ist sie – neben Hackschnitzeln und Holzpellets – speziell auch für aschereiche und zur Verschlackung neigende Brennstoffe geeignet.

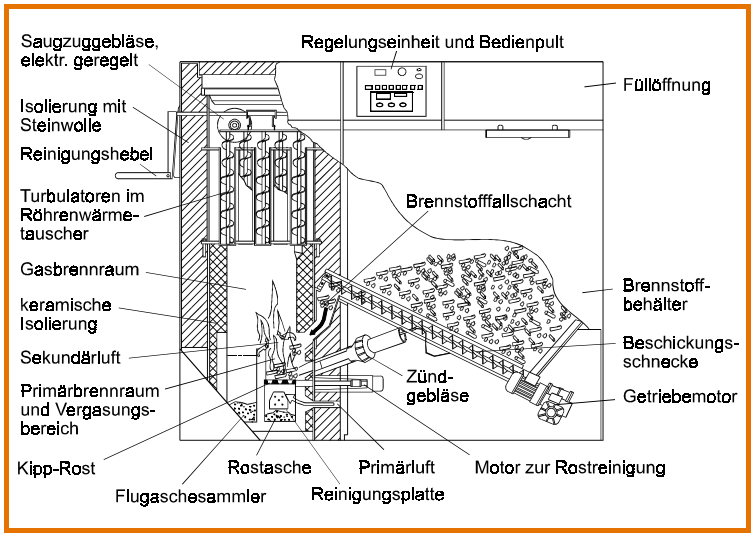


Abb. 6.17: Beispiel eines 15-kW-Pelletkessels mit Kipprost und Brennstoffvorratsbehälter (nach Guntamatic /6-17/)

Ein Teil der Verbrennungsluft wird als Primärluft durch den ggf. vorhandenen Rost, durch Luftdüsen im Seitenbereich der Brennmulde oder – bei Vorschubrostfeuerungen – über stirnseitige Luftkanäle in den Rostelementen eingeblasen. Dabei erfüllt die Primärluft auch die Funktion der Rostkühlung; dies mindert das Risiko von Schlackeanbackungen und Materialüberhitzung beim Einsatz kritischer Brennstoffe.

Die Sekundärluft wird oberhalb des Rostes bzw. des Glutbetts oder vor Eintritt in die Nachbrennkammer zugeführt. Die anfallende Asche fällt in einen Aschekasten der zum Teil manuell entascht wird. Bei aschereichen Brennstoffen kann die Asche aber mittels Schnecken auch automatisch in einen größeren Aschebehälter ausgetragen werden (Abb. 6.16).

6.2.1.3 Abwurffeuerungen (Pelletfeuerungen)

Für die Nutzung hochverdichteter Holzpellets werden – neben den ebenfalls verwendeten Unterschubfeuerungen – Abwurffeuerungen eingesetzt. Hierbei handelt es sich um eine Bauartengruppe, die speziell für Holzpellets entwickelt wurde und sich daher nicht für konventionelle Hackschnitzel eignet.

Die mit einer Förderschnecke zugeführten Pellets fallen über ein Rohr oder einen Schacht von oben auf das Glutbett. Dieses befindet sich entweder in einer herausnehmbaren Brennschale, auf einem Kipprost oder in einem Tunnel (vgl. Tabelle 6.3). Dort werden Primär- und Sekundärluft von unten bzw. seitlich ringförmig durch entsprechende Düsenbohrungen eingeleitet.

Bei Kipprostanlagen Abb. 6.17 wird die anfallende Aschemenge von Zeit zu Zeit (z. B. alle 16 Stunden) automatisch in den darunter liegenden Rostaschesammler abgeworfen. Um sicherzustellen, dass größere Ascheablagerungen vom Rost vollständig entfernt werden, prallt der als Lochplatte ausgeführte herunterklappende Rost gegen eine vertikale Reinigungsplatte im Bereich des Rostaschesammlers. Diese Reinigungsplatte ist im Abstand der Rostlöcher mit entsprechenden Stiften besetzt. Die zusammen mit der Asche abgekippten noch brennbaren Bestandteile glühen im Aschebett aus während neu zugeführte Pellets auf dem gereinigten Rost gezündet werden. Die Funktionsweise der beiden am häufigsten eingesetzten Abwurffeuerungsprinzipien wird auch in Abb. 6.18 erläutert.

Pelletbrenner werden auch als Nachrüstkomponenten angeboten, die ähnlich wie ein Erdgas- oder Heizölbrenner an einen bestehenden Heizkessel angeflanscht werden können, so dass damit auch der Umbau einer bestehenden Anlage möglich wird. Hierbei sind insbesondere Kombinationen mit Scheitholzkesseln üblich. Solche Brenner können als Unterschubfeuerung ausgeführt sein, oder es wird ein Tunnelbrenner verwendet, bei dem die Pellets von oben in ein Verbrennungsrohr hineinrieseln, während die Verbrennungsluft horizontal hindurchstreicht, so dass die Brennerflamme am anderen Ende seitlich in den Kesselraum austreten kann (Tabelle 6.3). Daneben werden für Holzpellets auch Quereinschubfeuerungen mit Schrägrost verwendet (ab ca. 10 kW Nennwärmeleistung).

Die dargestellten Prinzipien kommen auch in Einzelfeuerstätten (Kapitel 6.1.2.6) zum Einsatz. In Pellet-Zentralheizungsanlagen wird auch mit anderen

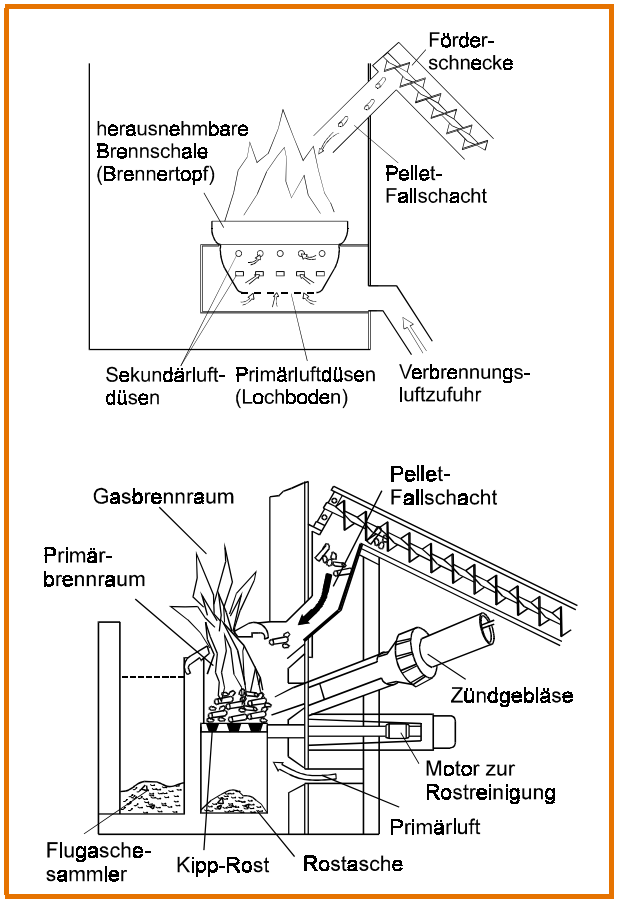


Abb. 6.18: Funktionsweise einer Holzpelletfeuerung mit Abwurfschacht als Schalenbrenner (oben) oder als Kipprostfeuerung (unten) /6-40/

Brennstoffen (z. B. gesiebte Hackschnitzel) experimentiert. Die Verwendung von anderen leicht rieselfähigen Körnerbrennstoffen wie Getreide, Ölsaaten oder Ackerbohnen ist jedoch wegen des hohen Aschegehalts und vor allem wegen der Verschlackungsneigung nicht problemlos möglich. Außerdem ist deren Einsatz in Kleinfeuerungen rechtlich problematisch (vgl. Kapitel 8.4).

6.2.1.4 Halmgutfeuerungen

Während Feuerungen für (schüttfähige) Halmgutbrennstoffe (Häckselgut, Pellets) auch für Holzhackschnitzel oder Holzpellets geeignet sind, ist dies umgekehrt nicht der Fall. Das liegt daran, dass landwirtschaftliche Festbrennstoffe wie Stroh, Gras, Ganzpflanzengetreide oder Getreidekörner gegenüber Holzbrennstoffen vielerlei Nachteile aufweisen, die einerseits eine aufwändigere und teurere Feuerungstechnik erforderlich machen und andererseits das Einhalten der derzeit gültigen Emissionsbegrenzungen erschweren. Das hat dazu geführt, dass diese Brennstoffe in der Praxis hierzulande – vor allem bei Kleinanlagen – nahezu bedeutungslos sind.

Die Brennstoffnachteile sind vielfältig. Der Heizwert ist zwar ist nur geringfügig niedriger als bei Holz, jedoch liegt der Aschegehalt in der Regel um etwa das Zehnfache höher. Auch beim Stickstoff-, Kalium- und Chlorgehalt weisen Halmgut oder Getreidekörner stets um ein Vielfaches höhere Werte auf als Holz (Abb. 6.19). Die genannten Stoffe sind nicht nur an der Bildung von Luftschadstoffen beteiligt, sie wirken auch bei der Korrosion und Verschlackung von Feuerraum- oder Wärmeübertragerflächen mit. Sie sind dadurch für die Feuerungskonstruktion von besonderer Bedeutung.

In Bezug auf die technische Einsetzbarkeit in Feuerungen kommt es aber auch auf das Erweichungsverhalten der anfallenden Aschen an. Auch hier erweist sich Strohasche mit Erweichungspunkten um 1 000 °C als deutlich kritischer verglichen mit Holz (Abb. 6.19), bei Getreidekörnern kommt es sogar noch früher zu Ascheverbackungen und Anhaftungen in der Anlage.

Halmgutfeuerungen weisen daher hinsichtlich verschiedener Merkmale wie Asche- und Schlackeabtrennung, Temperaturführung oder Brennstoffvorbehandlung einige Besonderheiten auf. Deshalb sind die speziell für relativ aschearme Holzbrennstoffe eingesetzten Systeme (z. B. Unterschubfeuerungen) für die Verbrennung von Halmgütern nicht geeignet; zumindest ist eine leistungsstarke Entaschung erforderlich. Bestimmte Rostfeuerungen sind dagegen für ein breiteres Brennstoffband – und somit zum Teil auch für Halmgut – einsetzbar. Den Nachteilen der hohen Verschlackungsneigung wird dabei durch Begrenzung der Verbrennungstemperaturen im Glut- oder Bettbereich begegnet (z. B. durch gekühlte Rostelemente,

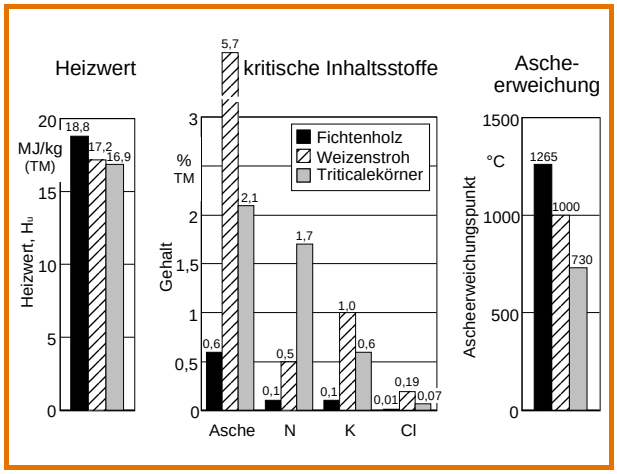


Abb. 6.19: Vergleich der Qualitätsmerkmale von Holz, Stroh und Getreidekörnern /6-23/

wassergekühlte Brennraumoberflächen). Auch durch das kontinuierliche Bewegen von Brennstoff und Asche (z. B. in Vorschubrostfeuerungen, Kapitel 6.2.1) wird teilweise vermieden, dass einzelne Schlacketeilchen – trotz ggf. eintretender Ascheerweichung – festhaften. Hinzu kommt, dass bei Halmgutfeuerungen verstärkt auf die Korrosionsbeständigkeit der Bauteile (vor allem im Wärmetauscherbereich) geachtet werden muss, wenn keine größeren Nachteile bei der Lebensdauer solcher Anlagen in Kauf genommen werden sollen. Zudem kann die Einhaltung der Emissionsbegrenzungen (Kapitel 8.5.2) vor allem beim Staubausstoß oftmals nur durch Einbau aufwändiger Reinigungsanlagen erreicht werden.

Für viele Kleinanlagen sind derartige Anforderungen und Techniken jedoch zu kostspielig. Das Angebot an halmguttauglichen Anlagen im Leistungsbereich bis ca. 100 kW ist daher sehr begrenzt. Ein Verzeichnis der in Frage kommenden Hersteller findet sich in Anhang D.

Bei der Strohverbrennung muss zwischen Schüttgutfeuerungen, die einen Ballenauflöser bzw. gehäckseltes oder pelletiertes Halmgut verwenden, und Ganzballenfeuerungen unterschieden werden. Beide Feuerungstypen werden nachfolgend vorgestellt.

Schüttgutfeuerungen. Anlagen mit Ballenauflösern kommen im Leistungsbereich unter 100 kW in Deutschland zur Zeit nicht vor. Für Brennstoffe, die jedoch bereits als Schüttgut vorliegen (z. B. Strohpellets, Häckselgut, Reinigungsabgänge der Saatgutaufbereitung, Bruchkörner, Mühlennebenprodukte, etc.) bietet sich die Verwendung einer Schubbodenfeuerung mit Wasserkühlung unter dem Glutbett an (vgl. hierzu Tabelle 6.3 in Kapitel 6.2.1). Derartige Anlagen werden bereits ab ca. 25 kW Nennwärmeleistung angeboten. Generell ist damit auch der Einsatz von Getreidekörnern technisch möglich.

Die Verbrennungstauglichkeit solcher zur Verschlackung neigenden Brennstoffe wird dadurch erreicht, dass sich unterhalb der Brennmulde ein Wasserwärmetauscher befindet, über den bereits eine nennenswerte Wärmeabnahme stattfindet, wodurch die kritische Temperatur, bei der die Bettasche erweicht und festhaften kann, in der Regel nicht überschritten wird. Zur Abtrennung der hohen Aschemenge ist eine solche Anlage außerdem mit einem oszillierenden Ascheschieber ausgestattet (Abb. 6.20). Ähnlich wie beim Schubboden eines Brennstofflagers (vgl. Kapitel 3.4.3) weist der Schieber ein keilförmiges Profil auf, wodurch die Asche mit der steilen Kante vorwärts in Richtung des Ascheabwurfs transportiert wird, während sich der Schieber in der Rückwärtsbewegung unter dem ruhenden Aschebett hindurch schiebt.

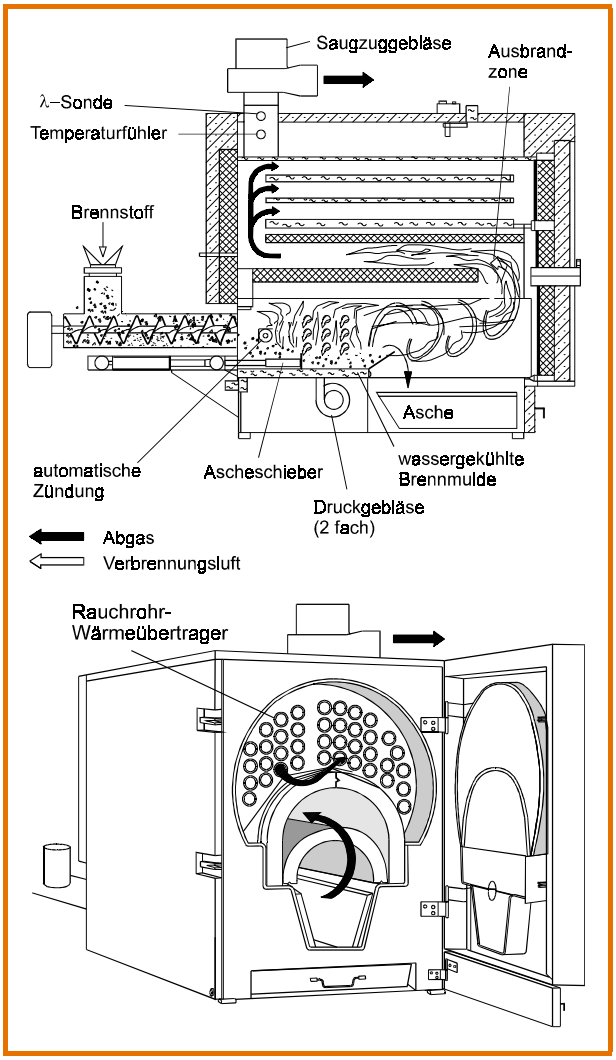


Abb. 6.20: Halmguttaugliche Schubbodenfeuerung (49 kW) mit wassergekühlter Brennmulde, hier ohne automatische Entaschung (/6-36/ nach Ökotherm /6-45/)

An der Entwicklung weiterer Feuerungskonzepte für derartige Problembrennstoffe wird derzeit bei verschiedenen Herstellern gearbeitet. Verbesserungsmöglichkeiten bestehen auch durch Verwendung von Zuschlagsstoffen zum Brennstoff, um so die Ascheerweichungseigenschaften zu verbessern und die Schadstoffbildung zu reduzieren. Bei stark zur Verschlackung neigenden Brennstoffen wie Getreidekörnern wurden mit dem Zumischen von ca. 2 % Branntkalk (CaO) zum Brennstoff deutliche Verbesserungen erzielt.

Ganzballenfeuerungen. Auf Grund der hohen Investitionskosten werden Ganzballenfeuerungen üblicherweise erst ab einem Leistungsbereich von ca. 150 kW

eingesetzt. Hierbei handelt es sich entweder um kontinuierlich beschickte Anlagen (ab ca. 2 000 kW) oder um absätzig, d. h. nacheinander beschickte Kleinanlagen, die in Dänemark bereits ab ca. 350 kW verwendet werden. Im Leistungsbereich bis 100 kW Nennwärmeleistung kommen derartige Anlagen in Deutschland heute praktisch nicht vor. Da hierfür jedoch zukünftig Einsatzchancen im ländlichen Raum gesehen werden, wird derzeit auch an der Entwicklung entsprechender kostengünstiger Strohballenverbrennungskonzepte gearbeitet.

Bei absätzig beschickten Ganzballenfeuerungen werden Anlagen für kleinere Hochdruckballen, die noch von Hand beschickt werden können, derzeit nicht mehr angeboten, da der Arbeitsaufwand zu hoch und die Verfügbarkeit von Kleinballenpressen kaum noch gegeben ist. Bei den heute gebräuchlichen Ballenmaßen erfolgt die Beschickung daher mechanisch; z. B. mit Frontlader-Schleppern, wobei in den größten Anlagen dieser Bauart bis zu drei Großballen (Rund- oder Quaderballen) gleichzeitig in den wassergekühlten Brennraum eingebracht werden können.

In der Ganzballenfeuerung findet – wie bei handbeschickten Feuerungen – eine chargenweise Verbrennung mit den ihr typischen Phasen von Flüchtigenabbrand und anschließender Kohleverbrennung statt (vgl. hierzu Kapitel 6.1.1). Wenn es sich um eine Anlage mit oberem Abbrand handelt (Kapitel 6.1.1), ist der diskontinuierliche und damit nur schwer regelbare Verbrennungsverlauf solcher Anlagen besonders ausgeprägt. Der Vorteil dieses Feuerungsprinzips liegt jedoch darin, dass die Anlagen für die verschiedensten Ballengrößen und -formen geeignet sind. Auf dem deutschen Markt werden derartige Anlagen jedoch derzeit nicht vertrieben.

In jüngster Zeit wird auch bei Ballenfeuerungen das Prinzip des unteren Abbrands eingesetzt (Abb. 6.21), allerdings ist hiermit auch eine Festlegung auf die eingesetzte Ballenform verbunden. Der Vorteil dieses Feuerungsprinzips besteht jedoch darin, dass der Feuerungsverlauf deutlich ausgeglichener und damit leichter regelbar ist.

Bei Anlagen mit Chargenabbrand treten generell im Verlauf der Verbrennung mehr oder weniger große Schwankungen von Leistung, Temperatur, Luftüberschuss und Schadstofffreisetzung (z. B. Kohlenstoffmonoxid) auf. Hierin besteht Ähnlichkeit mit den handbeschickten Holzfeuerungen. Deshalb sind chargenweise beschickte Ganzballenfeuerungen möglichst immer unter Volllast zu betreiben (vor allem kleinere Anlagen); sie benötigen daher im Regelfall einen relativ großen Wärmespeicher (vgl. hierzu Kapitel 6.1.4.3).

Ein Beispiel für den Aufbau einer kleinen Ganzballenfeuerung bietet Abb. 6.21. Zur Vermeidung von Ascheanbackungen kommt es – wie bei den Schüttgutfeuerungen für Halmgut – auch hier auf die Begrenzung der Temperaturen im Bereich der Bettasche an. Daher wird auch hier eine Kühlung des

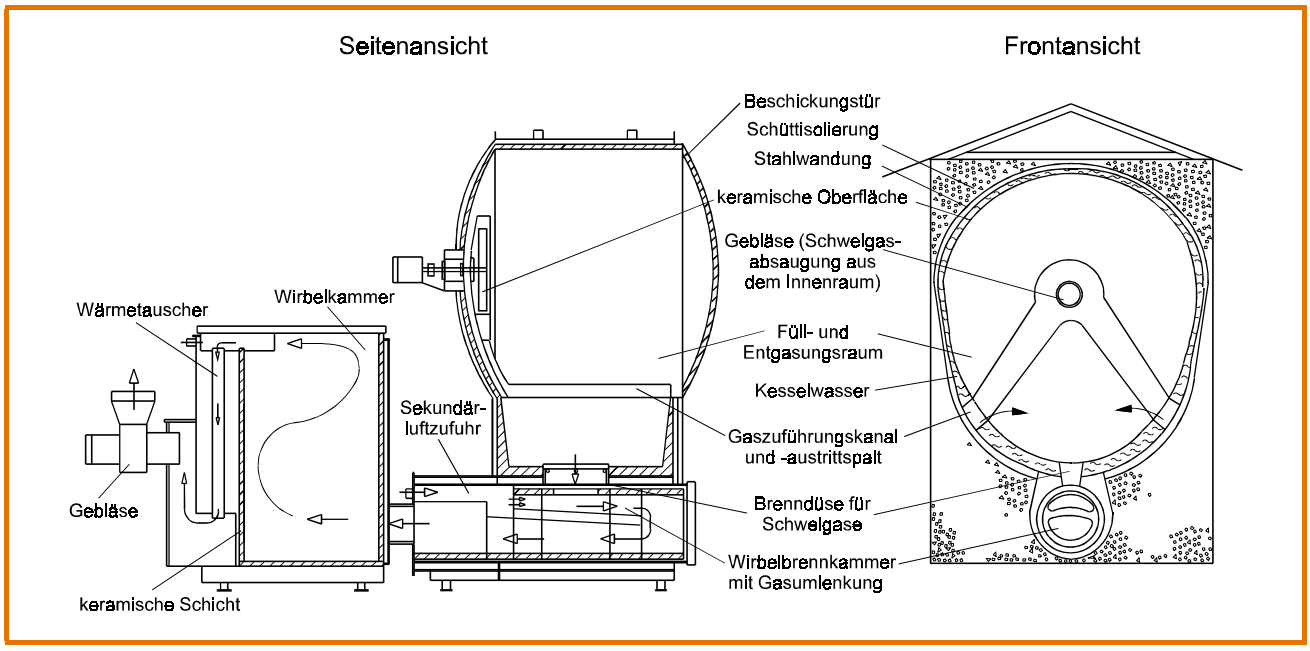


Abb. 6.21: Schema einer Rundballenfeuerung (145 kW) für Halmgut (nach Herlt /6-27/)

Glutbetts vorgenommen. Das geschieht mit Hilfe eines Wassermantels, der um den Brennraum herum verläuft. Die für die Verbrennung erforderliche Primärluft wird zusammen mit den im oberen Feuerraum abgesaugten Schwelgasen seitlich über Luftschlitze durch das Stroh hindurch geblasen, um im unteren Bereich der Brennkammer den Abbrand des hohl liegenden Ballens zu ermöglichen. Wie bei den handbeschickten Zentralheizungskesseln wird die Sekundärluft anschließend dem darunter liegenden Nachbrennraum (Wirbelbrennkammer) zugeführt.

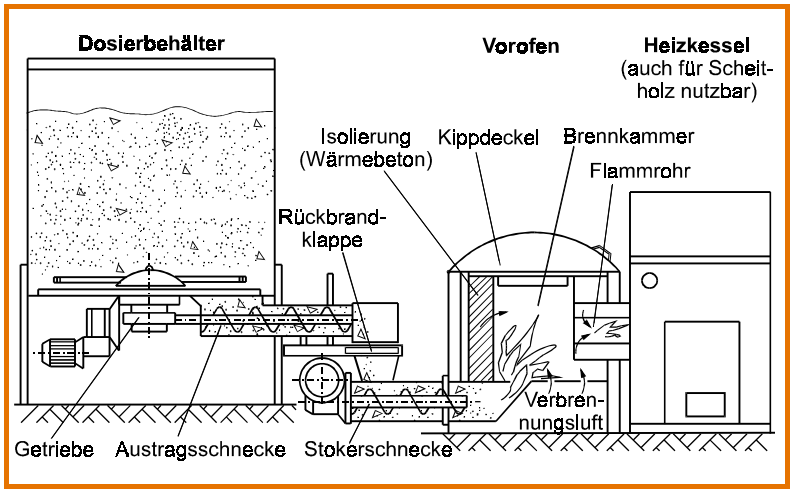


Abb. 6.22: Beispiel für eine Hackschnitzelfeuerung mit Vorofen und Scheitholzkessel (nach Fröling /6-14/)

In Deutschland stehen einem Einsatz von Strohfeuerungen mit mehr als 100 kW Nennwärmeleistung vor allem die hier zu Lande geltenden, relativ strengen Emissionsgrenzwerte für CO und Staub entgegen (vgl. Kapitel 8.5.2). Außerdem müssen Halmgutfeuerungen über 100 kW ein relativ aufwändiges Genehmigungsverfahrens durchlaufen, und die Schadstoffemissionen müssen von einem zugelassenen Messinstitut überwacht werden. Bei Holzfeuerungen gelten diese Bestimmungen erst ab einer Anlagenleistung von 1000 kW (Kapitel 8.5.3).

6.2.2 Feuerungskomponenten und Systemeinbindung

Bei der Einbindung einer Feuerung in ein Gesamtsystem sind viele anlagen-, heiz- und sicherheitstechnische Aspekte zu berücksichtigen. Außerdem bestehen vielfältige Anbindungsmöglichkeiten eines Brennstofflagers, die nachfolgend angesprochen werden.

Vorofenanlagen. Die in den vorgenannten Kapiteln dargestellten Feuerungsprinzipien werden bei Kleinanlagen in der Regel in Kompaktbauweise komplett angeboten, wobei die Komponenten Brennstoffzuführung, Feuerung, Wärmetauscher, Abgasgebläse und ggf. die Entaschung integriert sind. Möglich ist aber auch eine getrennte Verwendung von Baugruppen.

Das ist beispielsweise bei Vorofenfeuerungen der Fall. Hierbei wird die Primär- und Sekundärverbrennung in baulich getrennten Modulen realisiert. (Abb. 6.22). Der Vorofen umfasst die Brennstoffbeschickung sowie einen Fest- oder Vorschubrost. Die im schamottierten Vorofen (Entgasungsraum) gebildeten Brenn- und Abgase werden unter Sekundärluftzugabe über einen Flansch oder zum Teil auch über einen wärmegedämmten Flammkanal in das nachgeschaltete Kesselmodul geleitet. Häufig handelt es sich hierbei um einen bereits vorhandenen oder um einen ausgedienten Scheitholzkessel. Je nach Ausführung findet in diesem Kessel noch eine Nachverbrennung statt, bevor die Heizgase in den integrierten Wärmeübertrager gelangen. Die Zone der pyrolytischen Zersetzung und Vergasung ist damit von der Oxidation stärker als bei den übrigen Feuerungssystemen räumlich voneinander getrennt.

Mit Vorofenfeuerungen können zum Teil ältere Systemkomponenten weiter genutzt werden. Allerdings führt eine ungenügend wärmegedämmte und nicht wassergekühlte Vorfeuerung zu erhöhten Abstrahlungsverlusten. Im Vergleich zu den übrigen Feuerungsbauarten ist außerdem der Platzbedarf relativ hoch.

Wärmeübertrager. Im Unterschied zu den Scheitholzkesseln kommen bei Hackschnitzelfeuerungen auch Wärmeübertrager mit liegenden Rauchrohrbündeln zum Einsatz, da diese sich durch eine kompaktere Bauweise auszeichnen. Sie sind meist ein- bis dreizügig /6-25/. Für die Reinigung ist auf eine leichte Zugänglichkeit der Züge zu achten. Bei vertikalen Rauchrohrbündeln werden auch automatische Abreinigungssysteme angeboten. Deren Funktion wird bei den Scheitholzfeuerungen (Kapitel 6.1.4.2) beschrieben. Bei Verwendung von korrosionsfördernden Brennstoffen (z. B. Halmgut, vgl. Kapitel 6.2.1.4) kann die Lebensdauer des Wärmeübertragers stark vermindert sein. Mit Einschränkung gilt dies auch dann, wenn der Wärmeübertrager aus Edelstahl anstelle von Gusseisen gefertigt wurde.

Kombination mit anderen Wärmeerzeugern. Generell lassen sich Hackschnitzel- oder Pelletfeuerungen als alleinige Heizquelle ganzjährig vollautomatisch betreiben. Kombinationen mit Scheitholzkesseln können aber aus Kostengründen und bei Verfügbarkeit der Brennstoffe ebenfalls sinnvoll sein. Dieser Weg wird zum Beispiel häufiger mit Pelletfeuerungen beschritten (vgl. Kapitel 6.1.4.5).

Auch der kombinierte Betrieb mit Heizöl- oder Erdgasfeuerungen kann Vorteile bieten; zumal er bei größeren Heizwerken mit Nahwärmenetzen inzwischen überwiegend vorkommt. Bei Spitzenlastabdeckung durch fossile Brennstoffe lassen sich die Gesamt-Investitionskosten senken, während gleichzeitig die Hackschnitzelfeuerung in einem günstigeren Leistungsbereich betrieben wird. In diesem Fall müssen beide Feuerungen im Parallelbetrieb arbeiten, das heißt, dass sich die Einzelleistungen beider Feuerungen im Maximallastzustand addieren (Abb. 6.23).

Soll jedoch der Bereich des niedrigen Leistungsbedarfs mit fossilen Brennstoffen abgedeckt werden (z. B. bei geringer Anlagenauslastung für die Brauchwassererwärmung im Sommer), so werden die beiden Feuerungen nicht gleichzeitig, sondern alternativ zueinander betrieben. In einem solchen Fall wäre beispielsweise auch der Einbau eines ausreichend großen Wärmespeichers sinnvoll (vgl. Kapitel 6.1.4.3). Generell ist dessen Einsatz auch für Hackschnitzelfeuerungen sinnvoll, da der feuerungstechnisch ungünstige Teil- oder Schwachlast-Betriebszustand vermieden bzw. reduziert wird.

Bei beiden kombinierten Betriebsarten (Spitzen- und Schwachlastanwendung) leistet die Holzfeuerung in der Regel immer noch den größten Beitrag zur Gesamtwärmebereitstellung. Das wird anhand einer typischen Jahresdauerlinie in Abb. 6.23 ersichtlich.

Anbindung an das Brennstofflager. Hackschnitzelfeuerungen verfügen in der Regel über eine vollmechanisierte kontinuierliche Brennstoffnachlieferung aus dem Lagerraum. Das geschieht entweder absätzig über einen Zwischenbehälter, der von Zeit zu Zeit automatisch nachgefüllt wird (häufig bei Holzpelletfeuerungen), oder mit Hilfe einer Doppelschneckenzuführung mit Fallschacht (Abb. 6.22). Die hierbei verwendeten Entnahmesysteme aus dem Lagersilo (z. B. Blattfederaustrag, Konusschnecke, Schubboden, Schrägboden) werden in Kapitel 3.4.3 ausführlich dargestellt.

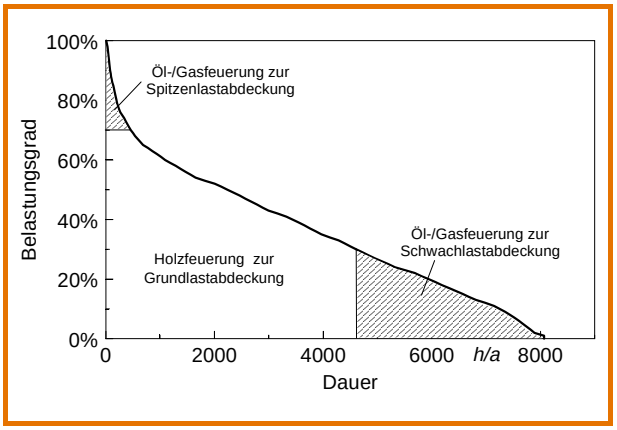


Abb. 6.23: Beispiel für eine Jahresdauerlinie bei Kombination einer Hackschnitzelfeuerung mit Öl-/Gasfeuerung zur Spitzen- oder Schwachlastabdeckung (Dauerlinie für Raumheizbedarf nach VDI 2066 /6-56/ bei einer Heizgrenze von 15 °C (Quelle: /6-21/)

Die Austragsebene des Silos ist bei Hackschnitzeln entweder waagerecht oder als schiefe Ebene angeordnet, je nachdem, wie der Zugang für Wartung oder Reparaturen an den beweglichen Teilen realisiert wird. In Abb. 6.24 werden einige in der Praxis übliche Einbaubeispiele für einen Silounterbau mit Blattfederrührwerk und Förderschnecke dargestellt. Ähnliche Anordnungen sind prinzipiell auch für die übrigen in Kapitel 3.4.3 genannten Austragssysteme denkbar.

Die Beschickung einer Pelletfeuerung kann prinzipiell mit den gleichen Techniken und Einbauvarianten realisiert werden wie bei Hackschnitzeln. Allerdings bieten sich hier auch kostengünstigere Lösungen in Form von Schrägbodenaustägen mit Schneckenförderung oder Luftabsaugsystemen an. Auch diese Techniken werden ausführlich in Kapitel 3.4.3 beschrieben.

Pelletkessel werden häufig mit einem Zwischenbehälter kombiniert (häufig als Kompaktanlage). Darin befindet sich ein Füllstandsmelder, der zum Teil auch den Nachfüllvorgang automatisch auslöst. Anders als bei Hackschnitzeln können hier auch verwinkelte Förderwege vom Lager zur Feuerung realisiert werden, da sich Pellets auch mit gebogenen achsenlosen Schnecken oder mit pneumatischen Fördersystemen (Luftstromförderung) transportieren lassen. Dadurch besteht eine weitaus größere Flexibilität bei der Nutzung vorhandener Räume. Ein Beispiel für eine solche Lageranbindung mit Luftstromförderung gibt Abb. 6.25.

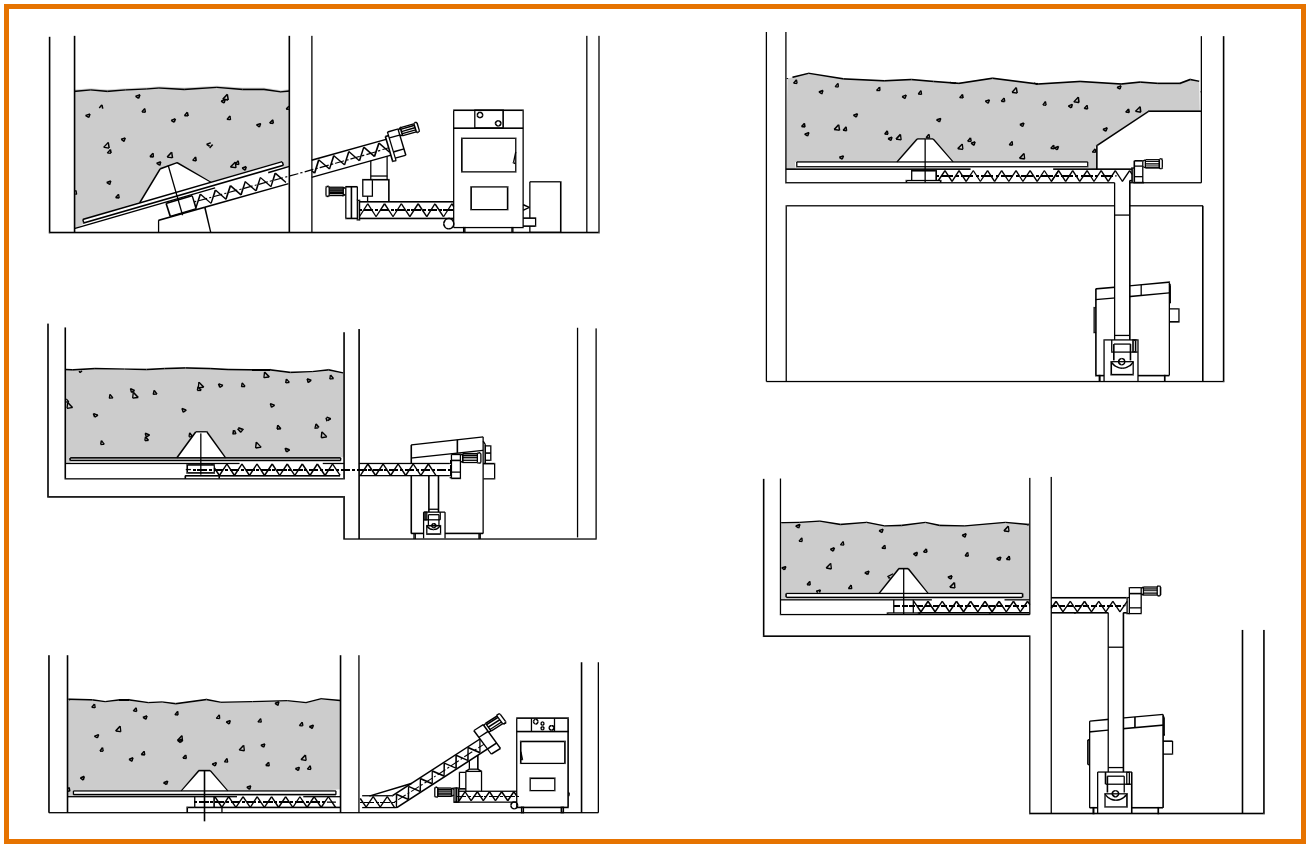


Abb. 6.24: Einbaubeispiele für Hackschnitzelfeuerungen mit Raumaustragsystem in der Ausführung als Blattfederrührwerk und Schneckenförderung (nach /6-28/)

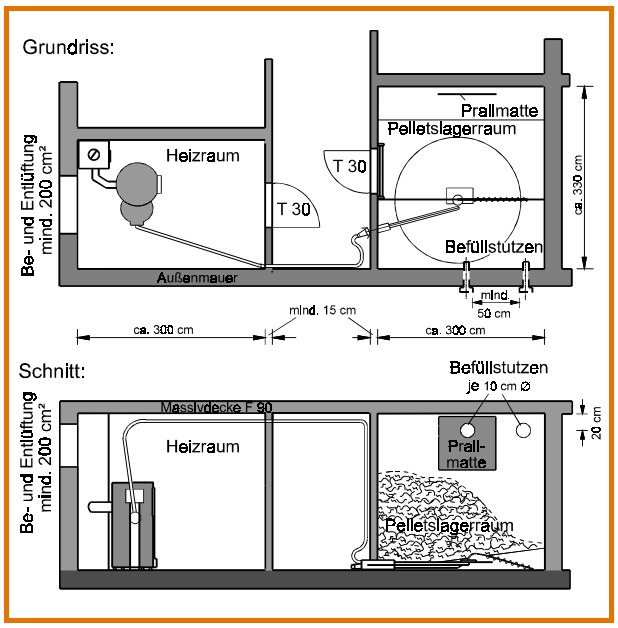


Abb. 6.25: Einbaubeispiel für eine Pelletheizung mit pneumatischer Austragung (nach ÖkoFen /6-44/)

6.2.3 Sicherheitseinrichtungen

Neben den allgemeinen Brandschutzregeln und -auflagen, die in Kapitel 8.2 angesprochen werden, verfügt eine automatisch beschickte Biomassefeuerung über spezielle Sicherungssysteme, die nachfolgend angesprochen werden.

Rückbrandsicherung. Automatische Biomassefeuerungen müssen über eine Absicherung gegen Rückbrand im Zuführungssystem verfügen. Diese Sicherung wird üblicherweise in Kombination mit der Fallstufe zwischen Austragsschnecke und Stokerschnecke verwirklicht. Die Fallstufe allein verhindert jedoch nicht, dass das Feuer im Brandfall von der Stokerschnecke über die Austragsschnecke zum Brennstofflager zurückbrennt. Hierzu ist mindestens ein Löschwassersystem vorzusehen, welches im Brandfall das Fluten der Stokerschnecke auslöst (Abb. 6.26, oben). Das geschieht bei Überschreiten einer kritischen Temperatur, die mit einem Temperatursensor an der Schnecke gemessen und an einen thermomechanischen Regler gemeldet wird. Das Löschwasserventil, das beispielsweise an eine Trinkwasserleitung angeschlossen ist, wird dann geöffnet. Da es sich um eine Ruhestromschaltung handelt, öffnet es auch bei Stromausfall. Der Nachteil dieses Systems besteht unter anderem darin, dass die Ventile bei schlecht gewarteten Systemen häufig lecken, so dass der Brenn-

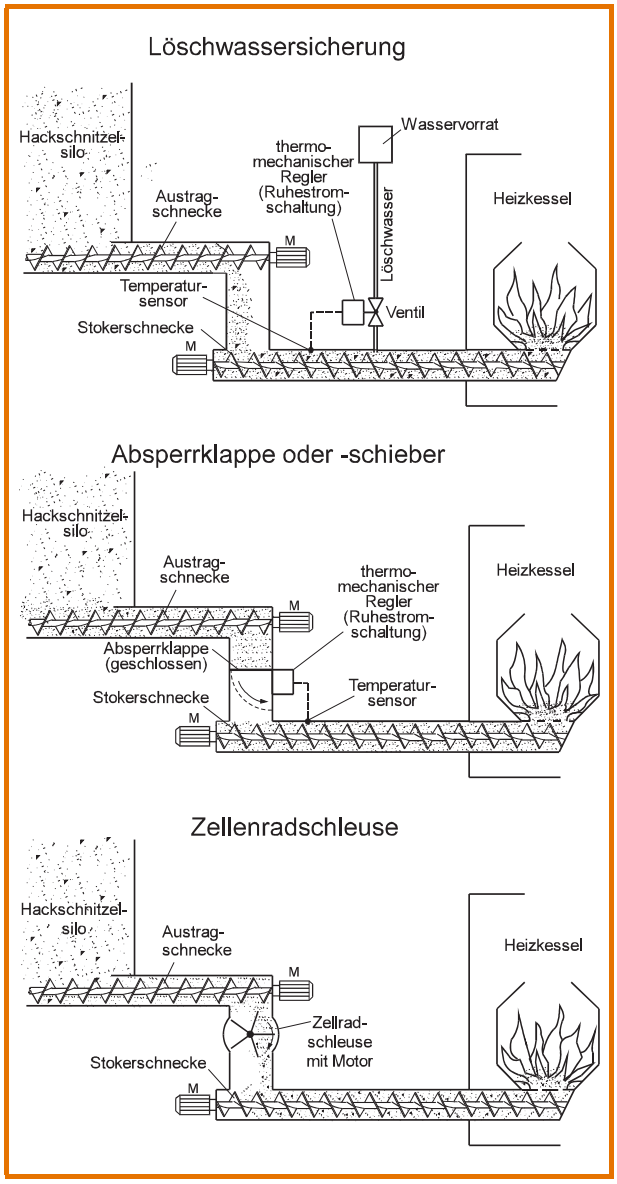


Abb. 6.26: Rückbrandsicherungen bei Hackschnitzel- und Pelletfeuerungen

stoff ständig befeuchtet wird. Außerdem besteht das Risiko von zündschnurartigen Rückbränden bis zum Lager, bei denen der Thermofühler keine Temperaturüberschreitung meldet und die Löschwassersicherung nicht anspringt.

Löschwassersysteme werden daher in der Praxis häufig mit weiteren Sicherungssystemen kombiniert. Hierzu zählt beispielsweise eine Absperrklappe oder ein Absperrschieber, der auch als alleiniges Sicherungssystem verwendet wird (Abb. 6.26, Mitte). Auch eine solche Sperrvorrichtung wird (stromlos) über einen thermomechanischen Regler ausgelöst. Das vollständige Absperren kann jedoch durch Ablagerungen behindert werden; außerdem können die Reaktionszeiten bei Verpuffungsreaktionen (Staubexplosionen) zu kurz sein.

Höhere Sicherheit bietet daher eine Zellenradschleuse, bei der der Brandweg zur Austragschnecke stets verschlossen bleibt (Abb. 6.26, unten). Hierbei handelt es sich um ein stählernes Zellenrad, welches sich in einem gusseisernen Gehäuse dreht, wobei es über einen Elektromotor angetrieben wird. Der Nachteil dieser relativ kostenintensiven Variante liegt in der Anfälligkeit gegenüber Fremdkörpern (z. B. aus Metall), durch die es zu Blockaden kommen kann. Sperrige Holzteilchen werden dagegen problemlos durch die scharfen Zellenradkanten zerkleinert. Auch die Zellenradschleuse wird häufig mit einem Löschwassersystem kombiniert.

Weitere Sicherheitseinrichtungen. Das Austreten brennbarer und giftiger Gase in den Heizungsraum kann durch einen konstanten Unterdruck im Feuerraum verhindert werden. Das wird beispielsweise durch eine Unterdruckregelung erreicht, sie unterstützt gleichzeitig auch den Durchtritt der Primärluft durch das Glutbett und ermöglicht zudem das Einhalten konstanter Verbrennungsbedingungen unabhängig vom Kaminzug.

Wie bei den Scheitholzkesseln verfügt auch eine Hackschnitzel- oder Pellet-Zentralheizung über einen Überhitzungsschutz in Form einer thermischen Ablaufsicherung (sog. Sicherheitswärmetauscher, vgl. Kapitel 6.1.4.1).

6.2.4 Regelung

Automatisch beschickte Feuerungen sind in der Regel teillastfähig und müssen somit über eine Leistungsregelung verfügen. Häufig wird die Verbrennung aber noch nach zusätzlichen Parametern des Abgases, d. h. nach dem Abgaszustand optimiert (abgasgeführte Verbrennungsluftregelung). Nachfolgend werden diese Regelungskonzepte vorgestellt.

Leistungsregelung. Sie erlaubt einen automatischen Betrieb bei mehreren fest vorgegebenen Leistungsstufen oder aber auch einen annähernd stufenlosen Betrieb. Anhand einer Information über die momentane Kesselleistung werden sowohl die Brennstoff- als auch die Verbrennungsluftzufuhr in Schritten von einigen Prozenten der Nennwärmeleistung variiert oder in manchen Fällen auch stufenlos verändert /6-41/. Als Regelgröße dient meist die Differenz zwischen dem Istwert und dem Sollwert der Kesseltemperatur. Die meisten automatischen Holzfeuerungen verfügen heute über eine Leistungsregelung, die einen kontinuierlichen Betrieb zwischen

100 % (Voll-)Last und 50 % (Teil-)Last erlaubt. Bei Kleinanlagen, die in der Regel nicht für hohe Brennstoffwassergehalte ausgelegt sind, ist der Leistungsbereich mit 30 bis 100 % häufig sogar noch weiter. Durch eine solche Leistungsregelung kann der Jahresnutzungsgrad verbessert werden, da die Bereitschaftsverluste infolge längerer Betriebszeiten der Feuerung geringer werden.

Unterhalb der kleinsten Wärmeleistung, die von der Feuerung im kontinuierlichen Betrieb noch erbracht werden kann, arbeiten die Anlagen im Ein-Aus-Betrieb. Für einen vollautomatischen Betrieb muss deshalb die Feuerung bei Bedarf aus dem abgeschalteten Zustand angefahren werden können. Dies wird über eine automatische Zündvorrichtung z. B. mittels Heißluftgebläse oder durch die Aufrechterhaltung eines Glutbetts (periodisches Nachschieben von Brennstoff) erreicht. Der Ein-Aus-Betrieb führt in der Regel zu höheren Emissionen als der kontinuierliche Dauerbetrieb, während der Gluterhaltungsbetrieb die Stillstandsverluste erhöht.

Verbrennungsregelung. Eine Verbrennungsregelung stellt eine zusätzliche Regelungsfunktion zur Leistungsregelung dar. Sie soll eine hohe Ausbrandqualität und einen hohen Wirkungsgrad sicherstellen. Dabei kommt es auf die Einstellung eines optimalen Brennstoff/Luft-Verhältnisses an (vgl. Kapitel 5.3). Da sich die Brennstoffeigenschaften (z. B. Schüttdichte, Feuchtigkeit, Holzart) im Verlauf der Verbrennung verändern können, müsste eine Anlage ohne Verbrennungsoptimierung bei jeder Brennstoffänderung neu einreguliert werden. Dies ist in der Praxis jedoch kaum möglich, daher werden automatische Feuerungen mit einer Regelung ausgestattet, welche die Verbrennungsbedingungen überwacht und die Feuerung selbsttätig optimal einreguliert.

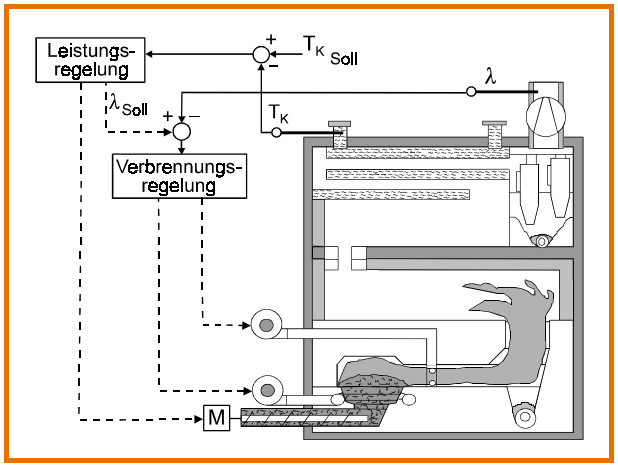


Abb. 6.27: Kombinierte Leistungs- und Verbrennungsregelung einer Hackschnitzelfeuerung /6-41/ (T_K Kesseltemperatur, λ Luftüberschusszahl „Lambda“, M Schneckenmotor) /6-41/

Das bei Hackschnitzelfeuerungen häufigste Konzept der Verbrennungsregelung ist die Lambda-Regelung. Hier erfolgt die Messung des Luftüberschusses (Kapitel 5.1) mittels einer Lambda-Sonde im Abgasstrom (Abb. 6.27). Der Luftüberschuss wird dabei durch die Brennstoffmenge, die Verbrennungsluftmenge oder die Sekundärluftmenge geregelt, wobei der Sollwert des Luftüberschusses in Abhängigkeit von der Leistung und ggf. von den Brennstoffeigenschaften vorgegeben wird. Um Luftmangelsituationen zu vermeiden, muss der Sollwert für Praxisanwendungen vorsichtig – d. h. eher zu hoch – bemessen sein. Dadurch wird eine Einbuße beim Wirkungsgrad in Kauf genommen.

An Stelle einer Lambda-Sonde werden als Abgassensoren gelegentlich auch Kohlenwasserstoff- oder Kohlenmonoxidsensoren verwendet. Zusammengenommen spricht man daher bei solchen Konzepten von einer abgasgeführten Verbrennungsluftregelung.

Kombinierte Leistungs- und Verbrennungsregelung. Um einen sicheren Betrieb der Feuerung zu gewährleisten, sollte zwischen der Leistungs- und der Verbrennungsregelung eine klare Aufgabenteilung herrschen. Das Zusammenspiel der beiden Regelkreise erfolgt dabei als Kaskade, in welcher die Leistungsregelung als übergeordneter, langsamer Regelkreis die Leistung beeinflusst und gleichzeitig Vorgabewerte an die Verbrennungsregelung als inneren, schnellen Regelkreis liefert (Abb. 6.27). Die Leistungsregelung gibt entweder die Luft- oder die Brennstoffmenge vor, und sie übermittelt einen Sollwert an die untergeordnete Verbrennungsregelung, welche die Feinregulierung der Brennstoff- oder der Luftmenge übernimmt /6-41/.

6.3 Schornsteinsysteme

Der Schornstein hat die Aufgabe, die Verbrennungsgase und Schadstoffe über das Dach ins Freie abzuführen. Dazu muss er stand- und brandsicher sein. Bei raumluftabhängigen Feuerungen muss er außerdem den Unterdruck erzeugen, durch den die notwendige Verbrennungsluft angesaugt wird.

Die rechtlichen Anforderungen und Bestimmungen an das Schornsteinsystem werden in Kapitel 8.2.3 erläutert. Die Bemessung des für die jeweilige

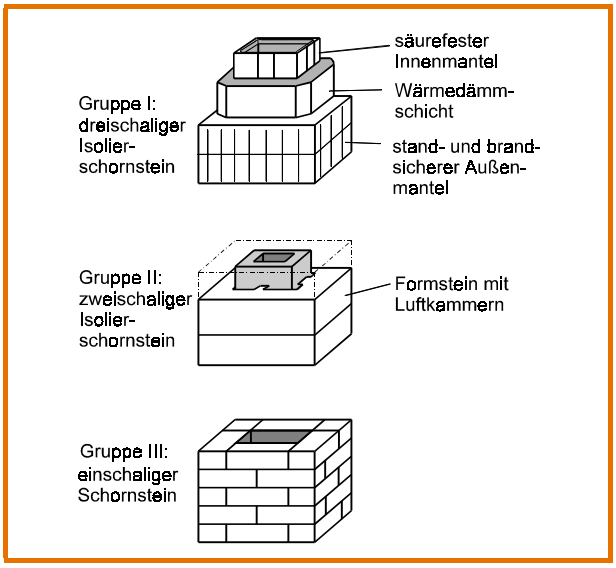


Abb. 6.28: Baugruppen von Schornsteinen (nach /6-1/)

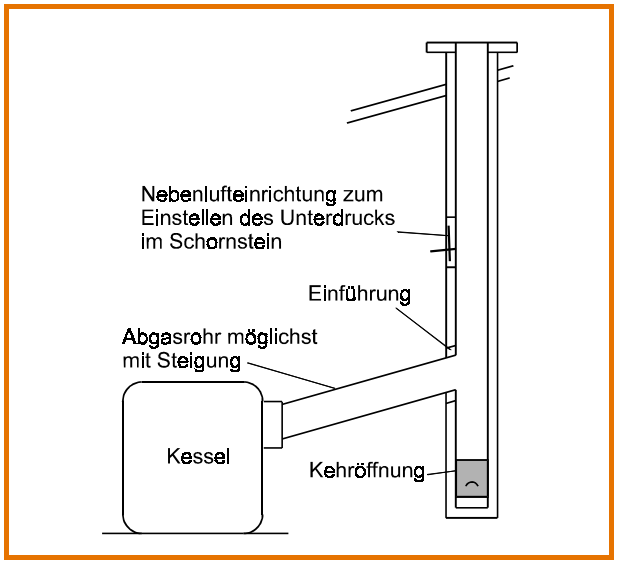


Abb. 6.29: Komponenten einer Abgasanlage (nach /6-1/)

Feuerungsart erforderlichen Schornsteinquerschnitts erfolgt nach DIN 18160 (vgl. Kapitel 8.2.3).

Baugruppen. Man unterscheidet drei Baugruppen von Schornsteinen (Abb. 6.28):

- Gruppe I: Dreischalige Isolierschornsteine. Sie sind geeignet für Festbrennstofffeuerungen aber auch für Öl- und Gasfeuerungen.
- Gruppe II: Zweischalige Isolierschornsteine. Weil der säurefeste Innenmantel fehlt, sind diese Schornsteine nicht feuchteunempfindlich.
- Gruppe III: Einschalige Schornsteine. Moderne Heizkessel können oftmals wegen der abgesenkten Abgastemperatur nicht mehr an einschalige Schornsteine angeschlossen werden, da Schwitzwasser und Säurebildung zu einer Versottung führen könnten. Meistens ist aber durch eine Querschnittsverringerung mit Hilfe eines Einzugrohres aus Edelstahl oder Schamotte eine Sanierung und Neueinordnung zur Baugruppe I möglich.

Die Verbindung zwischen Feuerstätte und Schornstein erfolgt nach Möglichkeit über ein aufwärts gerichtetes Rohr aus Stahlblech, Aluminium oder Edelstahl. Hierbei sind verschiedene Sicherheitsvorschriften zu beachten (Kapitel 8.2). Die Dichtheit wird durch ein Mauerfutter hergestellt. An jeder Umlenkstelle des Verbindungsrohres sowie am Fuß des Schornsteins müssen Reinigungsöffnungen angebracht sein (Abb. 6.29).

In das Schornsteininnere vorstehende Rohre lösen durch Querschnittsverengung Unterdruckstörungen aus, führen zu Ruß- und Flugascheablagerungen und versperren dem Kehrgerät des Kaminkehrers den

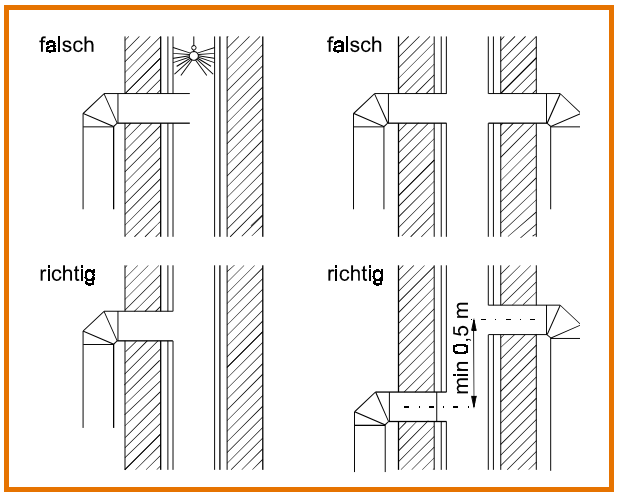


Abb. 6.30: Einmündung von Rauchgasrohren in Schornsteinen (nach /6-47/ /6-48/)

Weg. Sie müssen daher vermieden werden (Abb. 6.30). Ähnlich problematisch sind gegenüberliegende Rauchrohreinmündungen bei mehreren Anschlüssen an einen Kamin (vgl. hierzu auch Kapitel 8.2.3).

Wie bei Öl- und Gasfeuerungen ist auch bei Festbrennstofffeuerungen der Einbau einer Nebenluftregelung sinnvoll. Hierzu werden in der Regel selbsttätig arbeitende Kaminunterdruckregler (Pendelzugregler) verwendet, bei denen der Kaminzug über ein einstellbares Gegengewicht verändert werden kann. Zur Vermeidung von Stillstandsverlusten im Wärmeerzeuger werden Kamine oft auch mit Abgasklappen ausgestattet.

Schornsteindimensionierung. Während für Heizöl- oder Erdgasfeuerungen in Einfamilienhäusern meist

Kamine mit 12 bis 14 cm Innendurchmesser verwendet werden, ist bei Holzfeuerungen in der Regel ein größerer Querschnitt von 18 bis 20 cm sinnvoll (z. B. im Bereich zwischen 25 bis 50 kW Nennwärmeleistung). Das hängt mit den unterschiedlichen Abgasmengen zusammen, die bei den verschiedenen Brennstoffen auf Grund unterschiedlicher Elementarzusammensetzung und Wassergehalte anfallen. Durch Anpassung des Kaminquerschnitts lassen sich daher die Mindestanforderungen an die Abgasgeschwindigkeit bzw. an den statischen Unterdruck im Kamin erfüllen (vgl. Kapitel 8.2.3). Eine geringe Abgasgeschwindigkeit (z. B. unter von 0,5 m/s) ermöglicht einen Kaltlufteinfall mit Kondensatbildung im Mündungsbereich. Zu große Abgasquerschnitte können zu kritischen (niedrigen) Abgasgeschwindigkeiten führen. Bei Naturzuganlagen steigt außerdem die Abbrandgeschwindigkeit, wodurch die Wärmeverluste infolge erhöhter Abgastemperaturen steigen.

Der über einen frei stehenden Schornstein hinweg strömende Wind fördert den Schornsteinunterdruck, indem er die Abgase mit sich fortreißt. Werden Schornsteine aber von höheren Hausgiebeln, Dachflächen oder höheren Baumgruppen überragt, kann der Wind auch in die Schornsteinmündung einströmen, was mit Funktionsstörungen der Feuerungsanlage (vor allem im Naturzugbetrieb) und mit Geruchsbelästigungen verbunden sein kann.

Auch ein Hausdach kann die Windwirkung beeinflussen. Bei einem Steildach wird der angreifende Wind (Luv-Seite) auf der schrägen Dachfläche aufwärts abgelenkt, was sich auf die Abgasausbreitung günstig auswirkt. Hinter dem First (Lee-Seite) kann die Windwirkung jedoch in einen Fallwind umschlagen und den Abgasaustritt behindern (Abb. 6.31). Daher ist eine ausreichende Höhe der Schornsteinmündung über Gebäudeteilen oder benachbarten Gebäuden erforderlich. Die entsprechenden rechtlichen Anforderungen und Regeln sind hierzu in Kapitel 8.2.3 dargestellt.

6.4 Kleine Wärmenetze

Mit kleinen Nahwärmenetzen (sogenannte Mikronetze) kann von einer bestehenden Anlage aus die zentrale Wärmeversorgung von Nebengebäuden wie z. B. Gewächshäusern, Stallungen, Wohn- und Ferienhäusern übernommen werden. Außerdem ist die Versorgung mehrerer Häuser oder zum Beispiel auch einer Schule, Turnhalle oder eines Schwimmbads durch eine in der Nähe gelegene Heizzentrale möglich. Ein

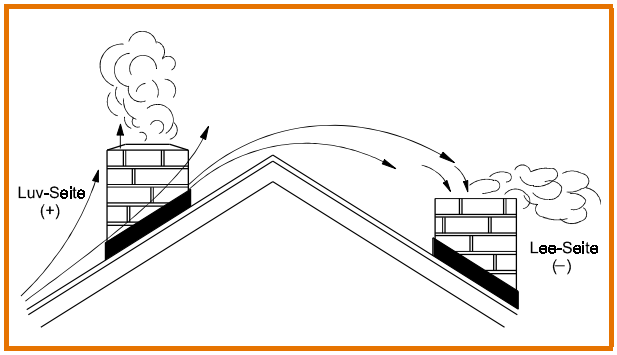


Abb. 6.31: Windwirkungen auf die Abgasausbreitung eines Schornsteins auf der Luv- und Lee-Seite eines Satteldach-Firstes (nach /6-47/)

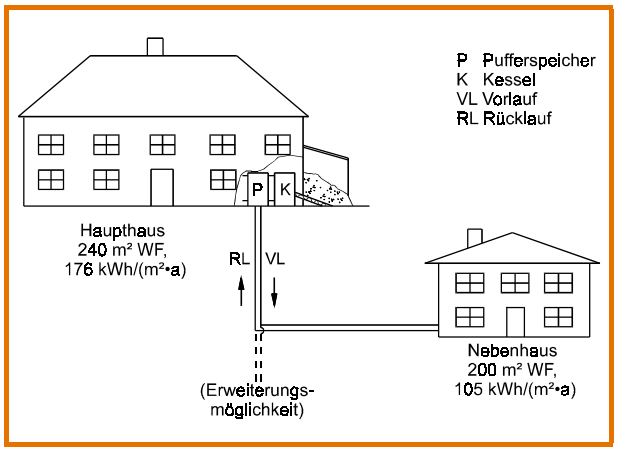


Abb. 6.32: Beispiel eines Kleinst-Nahwärmenetzes (nach /6-15/)

Beispiel zeigt Abb. 6.32. Bei den Mikronetzen handelt es sich in der Regel um Anlagen mit einem gesamten Leistungsbedarf von ca. 50 bis 300 kW, bei denen – anders als bei größeren Fernwärmesystemen – die Temperatur des Kreislaufwassers in der Regel unter 95 °C liegt /6-15/.

Anschlussdichte und Auslegung. Eine geringe Netzlänge und eine hohe Anschlussdichte von ca. 0,5 bis 1,0 kW/m sind gute Ausgangsbedingungen für den wirtschaftlichen und effizienten Betrieb eines kleinen Nahwärmenetzes. Daher ist der Anschluss von Einfamilienhäusern (insbesondere Niedrigenergiehäusern) mit Heizlasten von 5 bis 8 kW meistens weniger interessant. Hier liegt die spezifische Trassenlänge oft bei 4 bis 6 Metern pro Kilowatt Wärmeabnahme, so dass der Wärmetransport mit nur noch 0,25 bis 0,16 kW/m zu gering ist und die Verluste stark ansteigen.

Die Auslegung des Netzes sollte stets nach dem gesicherten Bedarf erfolgen, da eine Überdimensionierung zu hohen Verlusten und zu einem unwirt-

schaftlichen Betrieb führt. Bei mehreren Abnehmern (mehr als 10) ist ein Gleichzeitigkeitsfaktor bei der Wärmeabnahme zu berücksichtigen, der abhängig vom Nutzungsverhalten des angeschlossenen Verbrauchers zwischen 1,0 und 0,6 liegt. Zur Netzauslegung ist eine detaillierte Wärmebedarfserhebung für Raumwärme und Brauchwasser einschließlich der Wärmeverluste durchzuführen.

Um Netzverluste gering zu halten, sollte die Temperaturspreizung, d. h die Differenz zwischen der Vorlauf- und der Rücklauftemperatur, mindestens 30 Kelvin betragen, das gilt vor allem bei hohen Vorlauftemperaturen. Bei gut ausgelegten Systemen mit niedrigen Temperaturen (z. B. Vorlauf bis 60 °C, Rücklauf unter 40 °C) liegen die Netzverluste im Jahresmittel unter 10 %. Schlecht ausgelegte Netze können Netzverluste von über 20 % im Jahresmittel erreichen. Auf Hausübergabestationen kann bei kleinen Netzen meist verzichtet werden /6-15/.

Rohrsysteme. Für den Wärmetransport kommen wärmeisolierte Rohrsysteme zum Einsatz (Abb. 6.33, oben). Das Transportrohr aus Stahl- oder Kunststoff ist mit Polyethylen(PE)-Schaum oder Polyurethan(PU)-Schaum ummantelt. PU-Schaum hat eine geringere Wärmeleitfähigkeit, deshalb sind die so gedämmten Verbundrohre dünner als PE-Schaum-gedämmte Rohrleitungen. Bei Mikronetzen kommen als Rohrsysteme das Kunststoffverbundmantelrohr mit Stahlmediumrohr (KMR) und vor allem das flexible Kunststoffmedienrohr (PMR) zum Einsatz.

Bei größeren Nahwärmenetzen wird das Kunststoffverbundmantelrohr mit Stahlmediumrohr (KMR) eingesetzt; es ist ein robustes Rohrsystem, das für Temperaturen bis 140 °C und einen Druck bis 25 bar und ab einem Nominaldurchmesser (DN) von 20 bis DN 1000 mit Längen bis zu 16 m eingesetzt wird. Die Verbindung erfolgt über Muffen und Schweißen. Für Bögen und Abzweige werden Formteile verwendet, die nachgedämmt werden müssen. Nachteilig ist die große Längenänderung durch Wärmeausdehnung, die aufwändige Kompensationsmaßnahmen erforderlich macht.

Für die Unterverteilung und die Hausanschlussleitungen sind flexible Kunststoffmedienrohre (PMR) gut geeignet. Sie werden als Endlosrohr von einer Trommel abgewickelt (bis DN 110), sind leicht und einfach zu biegen und erlauben somit auch kleine Radien und eine flexible Leitungsführung. Allerdings werden teure Formstücke (Abzweige, T-Stücke, Reduzierungen) benötigt. Die Rohre kompensieren die Wärmeausdehnung selbst, so dass auch lange Trassen

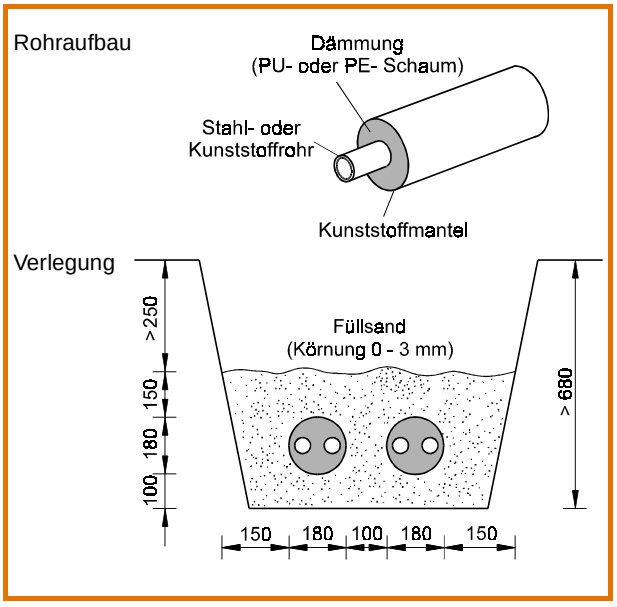


Abb. 6.33: Bild oben: Prinzipieller Aufbau eines Fernwärmerohres (Monorohr), Bild unten: Erdverlegung zweier Duo-Rohrleitungen für Nahwärme- sowie Brauch- und Trinkwasserversorgung (Maße in mm) (nach /6-30/)

bis 150 m keine Stoßstellen im Erdreich haben müssen, das heißt, es müssen keine U-Bögen zum Ausgleich der Längenausdehnung im Untergrund verankert werden. Mit dem PMR kann der Bereich von 10 bis 700 kW Heizleistung abgedeckt werden. Temperatur und Druck sind auf 95 °C bzw. 6 bar begrenzt.

Tabelle 6.4: Typische Merkmale und Eigenschaften sowie ungefähre Preise von isolierten PMR-Rohrleitungen in Nahwärmenetzen /6-30/

Dimension	Abmessung[a] (mm)	Leistung (kW)	Preis (€/m) Einzelrohr	Preis (€/m) Doppelrohr	Mantelrohr Ø (mm)	Wärmeverlust[b] W/(h m)
DN 20	25/20,4	10-30	22	35	128	21
DN 25	32/26,0	20-60	26	41	128	26
DN 32	40/32,6	40-90	33	50	160	27
DN 40	50/40,8	40-140	41	67	160	28
DN 50	63/51,4	70-230	54	-	160	32
DN 65	75/61,2	100-330	64	-	200	34
DN 80	90/73,6	150-480	70	-	200	37
DN 90	110/90,0	<700	78	-	200	41

a. Durchmesser innen/außen
b. Wärmeverlust für das Monorohr-Paar (Vor- und Rücklauf) in W/(h m) unter folgenden Bedingungen: T System 90/70 °C, T Erdreich 5 °C, lichter Rohrleitungsabstand 10 cm, Überdeckungshöhe 80 cm

Bei kleineren Anlagen bis DN 50 bietet es sich an, Duo-Rohre zu verlegen. Vor- und Rücklauf befinden sich hierbei in einem gemeinsamen Mantelrohr (Abb. 6.33, unten). Flexible Kunststoffmedienrohre gibt es auch als Quattro-Rohre, in welchen Heizungs-Vor- und -Rücklauf, Brauchwasser-Hauptleitung und Zirkulation integriert sind. Sie sind besonders bei engen Platzverhältnissen gut geeignet. Einige typische Eigenschaften von PMR-Rohrleitungen sind in Tabelle 6.4 zusammengestellt.

Verlegungsarten. Für kleine Netze werden sogenannte Strahlnetze verwendet, das heißt, dass die Rohrleitungen direkt vom Wärmeerzeuger zu jedem Verbraucher ohne Abzweigungen verlegt werden. Diese Verlegart weist bei kleineren und mittleren Netzanlagen die geringste Trassenlänge auf. Ein Ringnetz ist dagegen kostenträchtiger, ermöglicht aber die Einbindung weiterer Wärmeerzeuger an verschiedenen Netzpunkten. Es ist außerdem leicht erweiterbar und bietet eine hohe Versorgungssicherheit.

Bei Kleinwärmenetzen erfolgt oft eine Haus-zu-Haus-Verlegung, wobei eine Gruppierung von Abnehmern mit einer geringen Anzahl von Abzweigungen bei geringer Anschlussflexibilität (Erweiterbarkeit) verbunden wird. Eine Sonderform dieser Verlegungsart ist die Kellerverlegung, d. h. der Anschluss von unmittelbar angrenzenden Nachbarwohnungen oder -gebäuden im Keller. Dabei entfallen sämtliche Tiefbauarbeiten, und auch die Wartung ist erheblich erleichtert /6-15/.

Bei Kleinstwärmenetzen wird meist eine Trassenführung in Form einer Flachverlegung angestrebt. Hierbei wird ein Gefälle in den Leitungen vermieden. Dadurch ist keine Entlüftungseinrichtung an Hochpunkten und kein Einbau von Revisionsschächten erforderlich.

Der Graben wird so tief ausgekoffert, dass noch eine Mindestüberdeckung von 60 bis 80 cm erreicht wird (Abb. 6.33). Die Rohrleitung wird im Graben in einem Sandbett (nichtbindiger Sand, Körnung 0 bis 3 mm) verlegt. Dies dient der Druckentlastung und der Frostsicherheit. Sinnvoller ist eine große Überdeckung von 80 bis 120 cm für absolute Frostsicherheit. In 20 bis 30 cm Tiefe wird ein Trassenwarnband verlegt, um bei späteren Erdarbeiten einen Hinweis auf die erdverlegte Leitung zu geben.

Im Graben erfolgt die Verlegung in Schlangenlinien zur Kompensierung der Temperaturausdehnung. Bei längeren Leitungen erstellt man zur Wand abgewinkelte Hauseinführungen, um die axial wirkenden Ausdehnungskräfte der Rohrleitung außerhalb des Gebäudes abzufangen. Zur Hauseinführung mauert man das Verbundrohr üblicherweise ein. Bei schwierigen Bodenverhältnissen – z. B. wenn drückendes Wasser vorhanden ist – baut man eine Mauerdurchführung ein, durch die nur das Mediumrohr geführt wird. Die Dämmung und das Mantelrohr enden dann vor der Durchführung. Nachteilig ist hierbei, dass dadurch eine Kältebrücke entsteht. In jedem Fall sollte der Graben im Bereich der Hauseinführung mit nichtbindigem Material aufgefüllt werden.

Brauchwasser in Nahwärmenetzen. Da in kleinen Wärmenetzen in der Regel keine Hausübergabestationen vorhanden sind, erfolgt die Brauchwasserbereitstellung ebenfalls zentral über die Heizzentrale.

Bei der Brauchwassererwärmung wird entweder das kostengünstige Durchflusssystem, das Speichersystem oder das Speicherladesystem verwendet. Beim Speicherladesystem (mit externer Umwälzpumpe) und beim Speichersystem kann das Brauchwasser in Intervallen erwärmt werden. Die Brauchwassererwärmung erfolgt dabei meist im Vorrangbetrieb, das heißt, dass die Raumheizung während des Aufheizens nicht versorgt wird und der erforderliche Gesamtanschlusswert sinkt.

Bei kurzen Netzen mit Durchflusssystemen, bei denen das warme Brauchwasser direkt zur Verfügung gestellt wird und beim Verbraucher kein Speicher vorhanden ist, ist dagegen eine dauernde Zirkulation erforderlich. Hierzu wird ein weiterer Leitungsstrang (Vor- und Rücklauf) benötigt, und es kommt zu hohen Netzverlusten.

Bei Speichersystemen ist keine Brauchwasserzuleitung von der Heizzentrale zum Verbraucher vorhanden. Statt dessen wird Kaltwasser vom Verbraucher aus selbst in einem lokalen Speicher erwärmt. Als Wärmequelle dient das Nahwärmenetz, das hierzu in Intervallen betrieben wird. Dabei wird die Netzvorlauftemperatur nachts zum Beispiel für zwei Stunden auf 65 °C hochgefahren, um die externen Warmwasser-Tagesvorratsspeicher zu laden. Eine Temperatur über 60 °C ist auf Grund des erhöhten Kalkausfalls für das Brauchwasser nicht sinnvoll, kann jedoch aus hygienischen Gründen erforderlich sein, um der Legionellengefahr vorzubeugen /6-11/. Dies erfolgt beispielsweise durch eine wöchentlich einmalige Temperaturanhebung auf über 60 °C /6-15/.

Betreibermodelle und Lieferverträge. Als Betreiber eines Kleinst-Nahwärmenetzes kann eine Gemeinde, ein Landwirt, eine bäuerliche Genossenschaft, eine

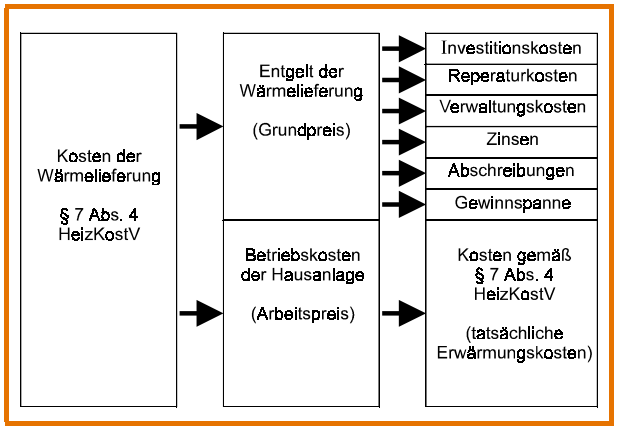


Abb. 6.34: Aufteilung der Wärmelieferkosten nach Grund- und Arbeitspreis /6-58/

Wohnungsbaugenossenschaft oder ein anderes Biomasseheizwerk auftreten. Für den Anschluss an das Netz wird bei größeren Netzen in der Regel eine Anschlussgebühr erhoben.

Es sind die verschiedensten vertraglichen Konstellationen und Verpflichtungen zwischen den beteiligten Parteien (sogenannte Contracting-Modelle) denkbar. Unter Contracting versteht man in der Wohnungswirtschaft die vertraglich geregelte Versorgung von Gebäuden und Siedlungen mit Energie in Form von Wärme, Kälte oder Elektrizität durch einen außenstehenden Betreiber /6-58/. Mögliche Formen des Contracting sind:

- Einspar-Contracting: Der Contractor versucht, die Anlage über die jährliche und langfristige Kosteneinsparung zu refinanzieren.
- Anlagen-Contracting: Der Contractor übernimmt die Investition für die Anlage, die Planung und den Betrieb bis zu einer vordefinierten Liefergrenze.
- Betriebsführungs-Contracting: Der Contractor übernimmt nur den Betrieb der Anlage und die Lieferung der Nutzwärme.
- Finanzierungs-Contracting: Der Contractor oder eine Betreibergesellschaft aus Objekteigentümer und Contractor übernimmt die erforderliche Investition für Planung, Errichtung oder Sanierung der Anlage.

Bei Abschluss eines Wärmelieferungsvertrages ist zu beachten:

- Haftungsabsicherung für Transport, Montage, Bau, Betrieb, Ausfall der Anlage,
- Absicherung für den Wärmelieferanten für Zahlungsunfähigkeit des Wärmeabnehmers (z. B. Bankbürgschaft, Grundbucheintrag),
- steuerliche und bilanztechnische Regelungen,
- Wärmepreis und Preisgleit-/änderungsklauseln /6-57/.

Die Kosten für die Wärmelieferung setzen sich zusammen aus dem Grund- und dem Arbeitspreis (Abb. 6.34). Im Grundpreis sind Investitionen, Reparaturkosten, Verwaltungskosten, Zinsen, Abschreibungen und eine Gewinnspanne enthalten, während im Arbeitspreis nur die in §7 Abs. 2 der Heizkostenverordnung genannten Kosten verrechnet werden dürfen.

Preisgleitklauseln können sich sowohl auf den Grundpreis als auch auf den Arbeitspreis beziehen. Sie regeln die Anpassung der Vergütungen auf Grund von Veränderungen in Anlehnung an die Lohnentwicklung und/oder die Veränderung der Primärenergiekosten. In entsprechenden Musterverträgen sind derartige Preisgleitklauseln meist berücksichtigt /6-58/.

7 Wirkungsgrad, Emissionen, Aschequalität

Für die Beurteilung von Feuerungsanlagen kommen eine Vielzahl von Kriterien in Frage. Nur wenige dieser Kriterien sind jedoch für eine objektive vergleichende Bewertung geeignet. Hierzu zählen der Wirkungsgrad und der Schadstoffausstoß. Beide lassen sich auf Basis weitgehend einheitlicher Prüfmethoden feststellen und gelten im weiteren Sinn als technisch-ökologische Qualitätsmerkmale, die zugleich anlagen- und brennstoffabhängig sind. Das Gleiche gilt für die Asche als unvermeidlicher Verbrennungsrückstand. Zu den drei genannten Beurteilungsschwerpunkten wird nachfolgend der Stand des Wissens und der Technik zusammengefasst.

7.1 Wirkungsgrade von Holzfeuerungen

Beim Wirkungsgrad unterscheidet man den feuerungstechnischen Wirkungsgrad und den Kesselwirkungsgrad. (zu den Definitionen vgl. Kapitel 5.1). Bei Einzelfeuerstätten und erweiterten Einzelfeuerstätten wird nur der feuerungstechnische Wirkungsgrad bestimmt, da der größte Teil der Nutzwärme von der Anlage direkt an die Umgebung und nicht indirekt über ein Wärmeträgermedium abgegeben wird. Nur bei Zentralheizungskesseln ist die Bestimmung beider Wirkungsgrade möglich.

Struktur der Wärmeverluste. Der Unterschied zwischen den beiden Wirkungsgradparametern lässt sich durch Betrachtung eines für Kleinkessel typischen Wärmeflussschemas veranschaulichen (Abb. 7.1). In den feuerungstechnischen Wirkungsgrad gehen die Verluste über die Wärme im Abgas, die brennbaren Rückstände in der Asche und die unvollkommene Verbrennung mit ein. Beim Kesselwirkungsgrad kommen noch die Abstrahlungsverluste der Kesseloberfläche hinzu, so dass der Kesselwirkungsgrad bei Kleinanlagen in der Regel um etwa 3 Prozentpunkte

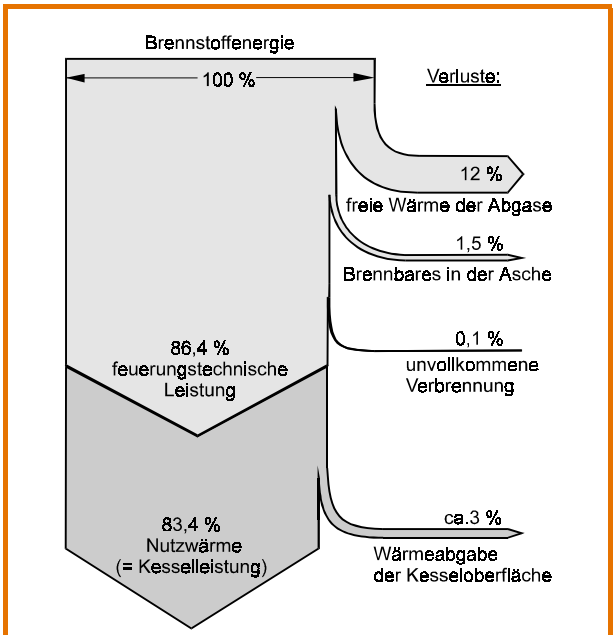


Abb. 7.1: Typisches Wärmeflussschema eines Hackschnitzelkessels (50 kW) bei Nennwärmeleistung /6-36/

niedriger liegt, als der feuerungstechnische Wirkungsgrad.

Das Flussdiagramm in Abb. 7.1 zeigt, dass der Wärmestrom des Abgases mit Abstand am meisten zu den Gesamtverlusten beiträgt. Konstruktive Maßnahmen zur Erhöhung des Wirkungsgrades zielen daher meist auf eine Minderung der Abgastemperatur ab, während die Verbesserung des Gasausbrandes hauptsächlich der Minderung der Schadstoffbelastung dient.

Die Absenkung der Abgastemperaturen stößt jedoch auf Grenzen, da bei den meisten Kaminsystemen eine Unterschreitung des Taupunktes vermieden werden muss, damit kein Kondensat anfällt. Das Kondensat durchfeuchtet nicht nur den Schornstein, sondern kann auch zu einer bleibenden Schädigung des Bauwerks (Mauerwerkverfärbungen, Ablagerungen) und zu einer erhöhten Brandgefahr (Schornstein-

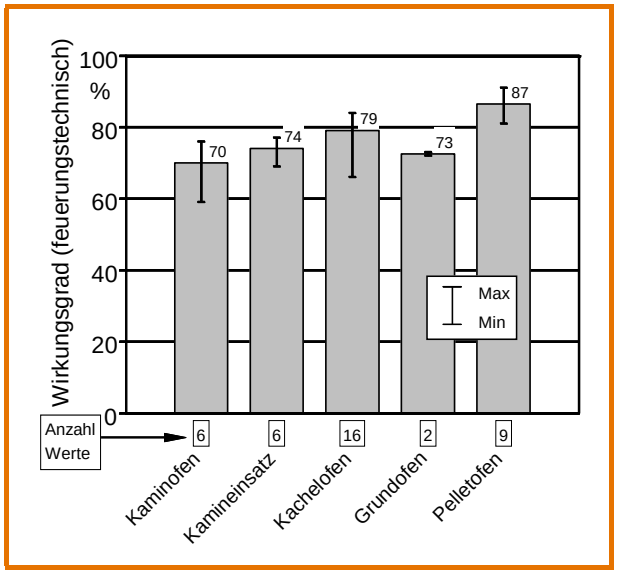


Abb. 7.2: Feuerungstechnische Wirkungsgrade von Einzelfeuerstätten für Holzbrennstoffe bei Nennwärmeleistung (Daten nach /6-33/, außer Pelletöfen: nach aktuellen Prüfberichten verschiedener Hersteller)

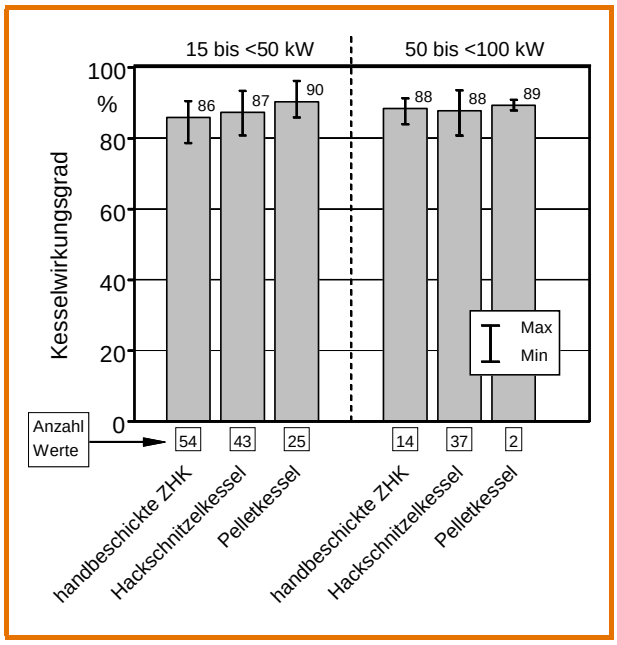


Abb. 7.3: Kesselwirkungsgrade von Zentralheizungsanlagen (ZHK) für Holzbrennstoffe bei Nennwärmeleistung (Quelle: Auswertung verfügbarer Prüfberichte verschiedener Hersteller seit 1991 (Hackschnitzel-ZHK), 1993 (handbeschickte ZHK) bzw. 1997 (Pellet-ZHK))

brand) führen. Daher wird auch bei der Kesselprüfung nach DIN EN 303-5 für die meisten Anlagen die Einhaltung bestimmter Mindestabgastemperaturen gefordert (vgl. Kapitel 8.1).

Wirkungsgrade von Einzelfeuerstätten. Bei der Gruppe der handbeschickten Einzelfeuerstätten ist mit feuerungstechnischen Wirkungsgraden im Bereich von 70 bis 80 % zu rechnen (Abb. 7.2). Deutlich über dieser Bandbreite liegt der Wirkungsgrad von Pelletöfen. Solche Feuerungen bieten mit durchschnittlich ca. 87 % eine mit den meisten Holz-Zentralheizungskesseln vergleichbare Brennstoffausnutzung (vgl. Abb. 7.3).

Die in Abb. 7.2 dargestellten feuerungstechnischen Wirkungsgrade beziehen sich lediglich auf die Feuerungsanlage selbst, da die Abgastemperatur stets im Abgasstutzen des Ofens und nicht am Kaminaustritt gemessenen wird. Ist jedoch ein langer Schornsteinweg vorhanden und führt dieser zudem durch beheizbare Räume, kann eine weitere Abkühlung des Abgases eintreten. Damit wäre die tatsächlich nutzbringend abgegebene Wärmemenge höher, wodurch auch der Wirkungsgrad des Gesamtsystems höher angesetzt werden müsste.

Bei den handbeschickten Einzelfeuerstätten ist aber davon auszugehen, dass die tatsächlichen Wirkungsgrade im Praxisbetrieb tendenziell eher etwas niedriger sind als in Abb. 7.2 dargestellt. Das liegt daran, dass ein effizienter Anlagenbetrieb gerade bei diesen Feuerungen in erheblichem Maß von der Bedienung durch den Betreiber beeinflusst wird; mögliche Bedienfehler (z. B. zu hoher Luftüberschuss, feuchtes Holz, überladener Feuerraum, zu grobes Holz) wirken sich hier besonders nachteilig aus. Derartige Fehler können aber in der Regel vermieden werden, wenn die entsprechenden Hinweise der Bedienungsanleitung befolgt werden.

Bei Pelletöfen sind die genannten Bedieneinflüsse kaum gegeben. Da es sich hier es um einen homogenen standardisierten Brennstoff handelt, der zudem weitgehend ohne Zutun des Betreibers automatisch beschickt wird, können die angegebenen Wirkungsgrade ohne weiteres auch auf die Praxis übertragen werden.

Wirkungsgrad von Zentralheizungsanlagen. Bei den Holz-Zentralheizungsanlagen werden üblicherweise nicht die feuerungstechnischen Wirkungsgrade sondern die um ca. 2 bis 4 Prozentpunkte niedrigeren Kesselwirkungsgrade angegeben (Abb. 7.3). Sie liegen fast durchweg im Bereich von mehr als 85 %. Bei Kesseln der neuesten Bauart wird inzwischen sogar die 90%-Grenze mehrheitlich überschritten. Am leichtesten ist das mit Pellet-Zentralheizungen möglich, sie liegen tendenziell um 2 bis 3 Prozentpunkte höher als die übrigen Holz-Zentralheizungsanlagen. Generell jedoch sind die Unterschiede zwischen den Bauarten und zwischen den Leistungsklassen gering.

Bei den angegebenen Kesselwirkungsgraden wird die an die Kesselumgebung abgegebene Wärme (z. B. Abstrahlung) definitionsgemäß als Verlust gewertet. Wenn jedoch auch im Aufstellraum ein gewisser Wärmebedarf besteht, so erhöht sich der Gesamtwärmenutzen aus Sicht des Betreibers. Das Gleiche gilt für die Abkühlung der Abgase im Schornsteinweg.

Kesselwirkungsgrade werden üblicherweise im Betrieb bei Nennwärmeleistung gemessen. Ein Anstieg der Wärmeverluste ist im Teillastbetrieb in der Regel aber nicht zu beobachten /6-36/. Vielmehr führt das Absenken der Heizlast – mit dem gewöhnlich auch ein Absinken der Abgastemperatur einhergeht – eher zu einer Verminderung des Abgasverlustes und somit zu einem Ansteigen des Wirkungsgrades (zumal der Abgasverlust die mit Abstand wichtigste Verlustgröße darstellt, vgl. hierzu Abb. 7.1). Wenn allerdings bei verminderter Heizlast ein zu hoher Luftüberschuss vorliegt (z. B. bei nichtoptimaler Anlageneinstellung), kann der Wirkungsgrad auch absinken.

Entwicklung der Wirkungsgrade. In den vergangenen Jahren hat auch bei den Holzheizungsanlagen eine technologische Weiterentwicklung stattgefunden, die sich sehr deutlich am Kesselwirkungsgrad ablesen lässt. Er ist seit Beginn der 80-er Jahre bis heute um ca. 30 Prozentpunkte gestiegen. Das zeigt die Auswertung einer Vielzahl von Messergebnissen aus Typenprüfungen (Abb. 7.4).

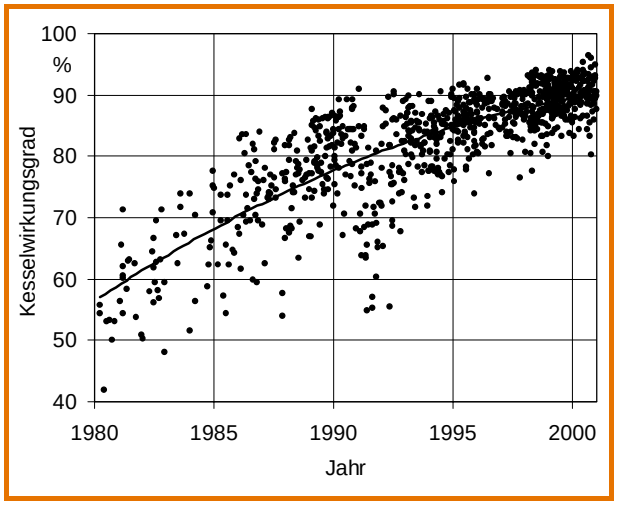


Abb. 7.4: Entwicklung der Kesselwirkungsgrade von hand- und automatisch beschickten Holzfeuerungen kleinerer Leistung seit 1980 – Ergebnisse aus Typenprüfungen bei Nenn- und Teilwärmeleistung (Quelle: BLT Wieselburg /7-1/)

7.2 Schadstoffemissionen

7.2.1 Bedeutung und Bezugsgrößen

Bei Holzfeuerungen ist vor allem die Bestimmung von vier Emissionsmessgrößen üblich: Kohlenmonoxid (CO), Staub, NO_x und flüchtige organische Kohlenstoffverbindungen. Deren Bedeutung als Schadstoff wird nachfolgend vorgestellt.

Bedeutung der Schadstoffe. Kohlenmonoxid (CO) ist ein geruchloses Gas, das – sobald es in die Atmosphäre, d. h. in sauerstoffreiche Umgebung gelangt – nicht lange stabil ist, da es leicht zu CO_2 oxidiert. Da CO leicht messbar ist, wird es im Allgemeinen als Indikator für die Güte einer Verbrennung angesehen und stellt somit den am häufigsten gemessenen Emissionsparameter der Verbrennung dar.

Bei den flüchtigen organischen Kohlenstoffverbindungen handelt es sich um höhermolekulare Verbindungen, sie werden häufig auch vereinfachend als Kohlenwasserstoffe (C_nH_m) bezeichnet. Im Gegensatz zum CO bilden sie eine Stoffgruppe mit wesentlich größeren Umwelt- und Gesundheitsrisiken, da sie zum Teil als kanzerogen eingestuft werden. Sie sind geruchlich stark wahrnehmbar und stellen den eigentlichen Grund für Geruchsbelästigungen dar. Wie das Kohlenmonoxid sind auch die flüchtigen organischen Kohlenstoffverbindungen das Ergebnis einer unvollständigen Verbrennung (vgl. Kapitel 5.2).

Staub kennzeichnet alle als Feststoff mit einer definierten Filterhülse abscheidbaren Anteile des Abgases. Er enthält hauptsächlich mineralische Bestandteile aus dem Brennstoff (Aschepartikel). Je nach Verbrennungsgüte können aber auch Teere und Rußbestandteile organischen Ursprungs enthalten sein. Außerdem lagern sich an Stauboberflächen auch eventuell gebildete hochtoxische Abgasbestandteile wie PAK oder Dioxine an. Besonders betroffen sind hiervon die Feinst-Staubanteile des Abgases (< 1 µm), da sie eine sehr hohe Oberfläche besitzen. Aus diesem Grund sind auch die im Abgasweg abgeschiedenen und bei der periodischen Reinigung anfallenden Stäube (Wärmetauscher- und Kaminasche) besonders belastet und giftig (vgl. Kapitel 7.3).

Stickoxide werden zunächst überwiegend in Form von NO emittiert. Dieses oxidiert in Gegenwart von Sauerstoff sehr schnell zu Stickstoffdioxid (NO_2). Bei der Emissionsmessung werden beide Verbindungen bestimmt und gemeinsam als NO_2 angegeben. NO_2 ist ein stechend riechendes, giftiges Gas, das ab etwa 1 ppm wahrgenommen wird, ab 25 ppm Augen-

reizungen und ab 150 ppm Lungenwegserkrankungen verursachen kann. Stickoxide sind auch an der Bildung von Ozon beteiligt, welches beim Menschen Augenreizungen, Kopfschmerzen und Atembeschwerden verursacht und darüber hinaus den Treibhauseffekt verstärkt.

Wie bei den meisten Verbrennungsprozessen können neben den oben genannten vier Standardmessgrößen eine Reihe weiterer Schadstoffemissionen relevant sein. Dazu zählt die Gruppe der aromatischen Kohlenwasserstoffe (z. B. PAK), der chlorhaltigen Schadstoffe (z. B. HCl, Dioxine und Furane) oder der Schwermetalle im Abgas. Auch die Korngrößenverteilung der als Staubemission anfallenden Flugaschen ist ein wichtiges Bewertungskriterium. Derartige Merkmale werden in den nachfolgenden Kapiteln jedoch nicht betrachtet, zumal hierzu für Kleinfeuerungen keine relevanten gesetzlichen Begrenzungen gelten und daher nur wenige Messwerte vorliegen (vgl. hierzu /6-35/, /6-36/). Ebenso wenig werden die Schwefeldioxidemissionen hier vorgestellt, da diese auf Grund des minimalen Schwefelgehaltes in den meisten Biomassebrennstoffen bedeutungslos /7-2/ und daher ebenfalls nicht gesetzlich limitiert sind.

Umrechnung von Messwerten. Die nachfolgenden Orientierungswerte erlauben eine grobe Bewertung und Unterscheidung der Biomassefeuerungen untereinander. Ein Vergleich mit konventionellen Öl- oder Gaskesseln ist jedoch nicht ohne weiteres möglich, da sich die gemessenen Emissionsangaben zwangsläufig auf unterschiedliche Abgas-Bezugszustände beziehen. Bei Kleinfeuerungen für Biomasse gilt in Deutschland einheitlich ein Bezugssauerstoffgehalt von 13 % O_2. Für Heizöl-, Erdgas- und Kohlefeuerungen werden andere Bezugsgrößen verwendet (z. B. 8 % O_2 bei Kohle-Zentralheizungsanlagen). Zur Umrechnung in einen fremden Bezugssauerstoffgehalt wird in Anhang I eine Tabelle mit Umrechnungsfaktoren und ein Rechenbeispiel gegeben.

Auch der Vergleich mit größeren Anlagenleistungen (z. B. bei Holzfeuerungen ab 1000 kW) ist nicht ohne Umrechnung der Messwerte möglich, da hier Bezugssauerstoffgehalte von 11 % gefordert werden. Eine häufig vorgenommene Umrechnung erfolgt von 11 auf 13 % Bezugssauerstoff. Hier gilt der Faktor 1,25, das heißt:

$$1\ mg/Nm^3 \text{ bei } 13\ \%\ O_2 = 1{,}25\ mg/Nm^3 \text{ bei } 11\ \%\ O_2$$

Gelegentlich werden Prüfberichte oder Emissionsbegrenzungen nicht auf einen Normkubikmeter sondern auf die aufgewendete Brennstoffenergie bezogen (z. B. in Milligramm pro Megajoule oder pro Kilowattstunde). Hier ist die Umrechnung wesentlich komplizierter, da sie nicht nur vom O_2-Bezug sondern auch vom Wassergehalt während der Messung und von der verwendeten Brennstoffart (d. h. der Brennstoffzusammensetzung) abhängt. Wenn aber der Wassergehalt und die Holzart bekannt sind, kann die Umrechnung mit Hilfe von angenäherten Umrechnungsfaktoren vorgenommen werden. Eine entsprechende Tabelle sowie ein Rechenbeispiel finden sich in Anhang J. Für überschlägige Berechnungen gilt folgende Faustformel (hier für Buchenholz bei ca. 20 % Wassergehalt und 13 % Bezugssauerstoff):

$$1\ mg/Nm^3 \approx 0{,}65\ mg/MJ \approx 2{,}34\ mg/kWh$$

Vergleichswerte von Öl- und Gasfeuerungen. Bei den konventionellen Heizöl- oder Erdgas-Zentralheizungsanlagen können vor allem CO, flüchtige organische Kohlenstoffverbindungen, NO_2 und SO_2 entstehen. Die Bildung von Stäuben beschränkt sich auf Grund des fehlenden Aschegehalts im Brennstoff auf Rußkomponenten. Ruß entsteht aber praktisch nur bei Ölbrennern und bei diesen vor allem in der Startphase.

Erdgas besitzt gegenüber Heizöl deutliche Emissionsvorteile, die sich in niedrigeren Stickoxidemissionen und in der rußfreien Verbrennung darstellen (Tabelle 7.1), außerdem entstehen erheblich geringere Schwefeldioxidemissionen. Im Vergleich zu Holzbrennstoffen weisen beide fossile Brennstoffe bei den genannten Parametern größtenteils Vorteile auf. Das zeigt ein Vergleich der Werte in Tabelle 7.1 mit den Emissionen von Holzheizkesseln in Kapitel 7.2.2.2. Allerdings müssen diese (lokalen) Nachteile gegen die (globalen) Vorteile der Erneuerbarkeit des Brennstoffs und der damit verbundenen Minderung des CO_2-bedingten Treibhauseffektes (Kapitel 2) abgewogen werden.

Tabelle 7.1: Orientierungswerte zum Schadstoffemissionsniveau von Heizöl(EL)- und Erdgas-Zentralheizungskesseln bis 100 kW Nennwärmeleistung (nach /7-9/). (Zum besseren Vergleich wurden die Angaben hier in mg/Nm³ bei 13 % O_2 umgerechnet)

Parameter	Heizölkessel	Erdgaskessel
	in mg/Nm³ (bei 13 % O_2)	
CO	ca. 8,6	ca. 8,6
flücht org. C	< 2,2	< 2,2
NO_x	43 - 65	22 - 39
Staub (hier: Ruß)	bis ca. 0,2	-

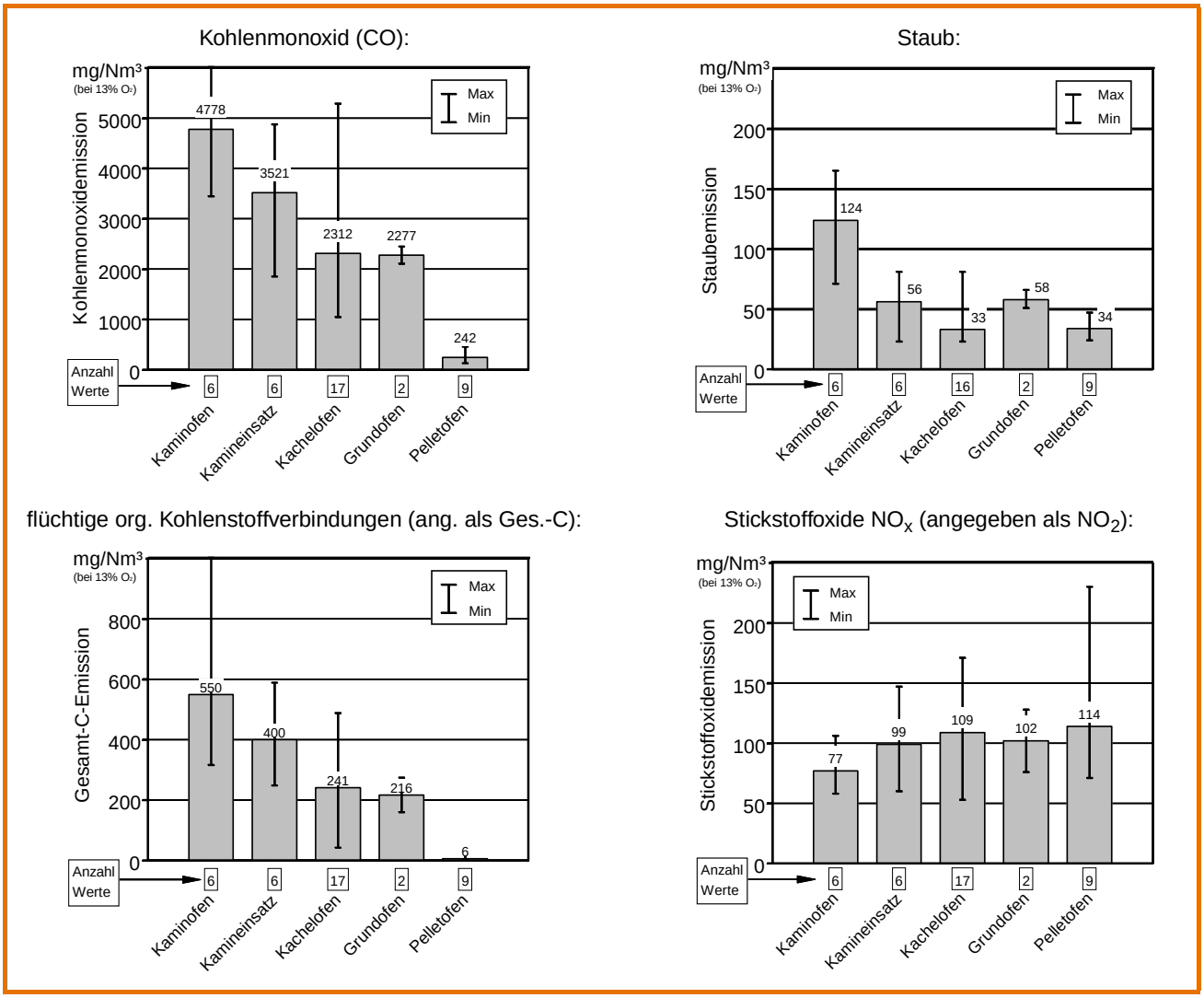


Abb. 7.5: Schadstoffemissionen von Einzelfeuerstätten für Scheitholz (jeweils Buche und Fichte je Feuerung) und von Holzpelletöfen (Quelle: Scheitholzöfen nach /6-33/, Pelletöfen nach aktuellen Prüfberichten verschiedener Hersteller)

7.2.2 Emissionsniveau von Biomassefeuerungen

Bei den nachfolgend dargestellten Schadstoffemissionen von Biomassefeuerungen wird nach Bauartengruppen, Brennstoffen, Brennstoffformen bzw. Beschickungsarten sowie zum Teil nach Leistungsklassen differenziert. Hierbei erfolgt eine Beschränkung auf die wesentlichen limitierten Schadstoffe. Das sind vor allem Kohlenmonoxid (CO) und Staub, die für einige Feuerungsbauarten und Leistungsklassen gesetzlich limitiert sind (Kapitel 8.5.2), sowie die Emissionen von NO_x und den flüchtigen organischen Kohlenstoffverbindungen, die bei Kleinanlagen nicht verpflichtend und daher seltener gemessen werden.

7.2.2.1 Emissionen von Einzelfeuerstätten

Das Emissionsverhalten von Einzelfeuerstätten ist in Abb. 7.5 abzulesen. Bei derartigen Feuerungen (Kaminöfen, Kachelofen- und Grundofeneinsätze, Pelletöfen etc.) wird der Schadstoffausstoß in der Regel nicht routinemäßig geprüft, da die bestehenden Emissionsgrenzwerte erst ab einer Nennwärmeleistung von 15 kW einzuhalten sind (Kapitel 8.5) und für das Inverkehrbringen eines derartigen Bauprodukts keine heiztechnische Prüfung erforderlich ist. Aus diesem Grund sind Emissionsmessungen an derartigen Feuerungen stets freiwillig, oder sie erfolgen stichprobenartig im Rahmen von öffentlich veranlassten Messserien zur Feststellung des Standes der Technik und der Umweltbelastungen. Die nachfolgend vorgestellten Orientierungswerte zum Emissionsverhalten von Einzelfeuerstätten basieren daher größtenteils auf einer solchen Reihenuntersuchung, die allerdings schon in den frühen 90-er Jahren durchgeführt wurde und somit nicht den allerneuesten Stand der Technik

wiederspiegelt. Das gilt jedoch nicht für die Pelletöfen, die hier auf Basis von Ergebnissen aus freiwilligen Prüfungen beurteilt werden.

Bei den handbeschickten Einzelöfen liegen die durchschnittlichen Kohlenmonoxidemissionen zwischen 2000 und 5000 mg/Nm^3, wobei die fest eingebauten gemauerten Feuerungen wie Kachelöfen am günstigsten abscheiden (Abb. 7.5). Eine deutliche Ausnahme bilden die Pelletöfen, die nur ein Zehntel bis ein Zwanzigstel der Schadstoffemissionen von Scheitholzöfen aufweisen.

Noch deutlicher sind diese Vorteile bei den flüchtigen organischen Kohlenstoffverbindungen, die häufig vereinfacht als Kohlenwasserstoffe bezeichnet werden. Die Unterschiede zwischen den Feuerungen entsprechen hier der Rangfolge der CO-Emissionen (Abb. 7.5). Darin zeigt sich, dass die Kohlenmonoxidemission als Leitgröße für die Verbrennungsqualität anzusehen ist und auch Rückschlüsse auf den Ausstoß flüchtiger organischer Kohlenstoffverbindungen zulässt.

Das gilt nicht ohne weiteres beim Staubausstoß. Lediglich in ungünstigen Fällen, bei denen auf Grund einer besonders unvollständigen Verbrennung auch Ruß und Teere gebildet werden, kann der Feststoffanteil im Abgas parallel mit den CO-Emissionen ansteigen. Die tendenziell höheren Staubemissionen bei den Kaminöfen können zum Teil auf diesen Zusammenhang zurückzuführen sein (Abb. 7.5).

Der NO_x-Ausstoß wird hauptsächlich durch den Stickstoffgehalt im Brennstoff bestimmt; der Einfluss der Feuerungstechnik ist bei kleineren Biomassefeuerungen gering. Da es sich in allen Fällen um Holzbrennstoffe mit nur geringen Unterschieden beim N-Gehalt handelt, zeigt sich bei den Einzelfeuerungen für den NO_x-Ausstoß ein relativ einheitliches Bild (Abb. 7.5).

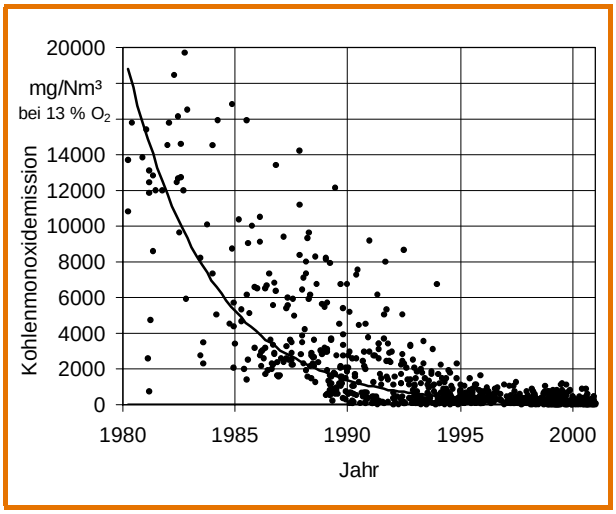


Abb. 7.6: Entwicklung der CO-Emissionen von hand- und automatisch beschickten Holzfeuerungen kleinerer Leistung seit 1980 – Ergebnisse aus Typenprüfungen bei Nenn- und Teilwärmeleistung (Quelle: BLT /7-1/)

7.2.2.2 Emissionen von Holzheizkesseln

Bei den Zentralheizungskesseln für Holzbrennstoffe wird in der Regel ein deutlich niedrigeres Niveau des Schadstoffausstoßes als bei den handbeschickten Einzelfeuerstätten erreicht. Das gilt insbesondere für die von der Verbrennungsgüte abhängigen Schadstoffe wie CO, Gesamt-C und zum Teil auch Staub.

CO-Emissionen. Die CO-Emissionen eines Scheitholzkessels liegen in der Regel bei etwa einem Zehntel des bei Scheitholzöfen gemessenen Wertes (Abb. 7.7), obwohl es sich um die gleiche Beschickungsart handelt. Allerdings ist die Bandbreite der Messwerte auch bei den Scheitholzkesseln noch sehr groß. Das liegt an der Variantenvielfalt innerhalb der Bauart (Naturzuganlagen, Gebläsefeuerungen, lambda-geregelte Anlagen). Tendenziell markieren die Scheitholzkessel mit abgasgeführter Verbrennungsluftregelung (vgl. Kapitel 6.2.4) das untere Ende der Bandbreite bei den CO-Messwerten /6-33/, die hier zwischen 20 bis 1700 mg/Nm^3 schwanken. In allen Fällen wird der geltende Emissionsgrenzwert von 4000 mg CO/Nm^3 problemlos unterschritten (vgl. hierzu Kapitel 8.5.2).

Der Wechsel der Beschickungsart von hand- auf automatische Beschickung bedeutet eine deutliche Verbesserung der Feuerungsqualität, was sich bei den CO- und den Gesamt-C-Emissionen niederschlägt. Dabei sind die Unterschiede zwischen Hackschnitzel- und Pelletfeuerungen relativ gering. In der Praxis ist jedoch mit größeren Vorteilen für Pelletkessel zu rechnen, da es sich bei den Pellets um einen Brennstoff mit gleichbleibend hoher Brennstoffqualität handelt (homogener normgerechter Brennstoff), während bei Hackschnitzeln oft sehr uneinheitliche Qualitäten eingesetzt werden, die deutlich von den zur heiztechnischen Prüfung verwendeten Brennstoffen abweichen können. Praxismessungen zeigen daher oftmals größere Unterschiede zu den hier dargestellten Prüfstands-Mittelwerten /7-7/.

An den CO-Emissionen lässt sich die technologische Entwicklung der vergangenen Jahre ablesen, sie hat auch bei den Holzfeuerungen seit Beginn der 80-er Jahre zu einer deutlichen Absenkung des Schadstoffausstoßes geführt. Das geht aus der Auswertung von Messergebnisse aus Typenprüfungen hervor (Abb. 7.6). Analog dazu sind entsprechende Verbesse-

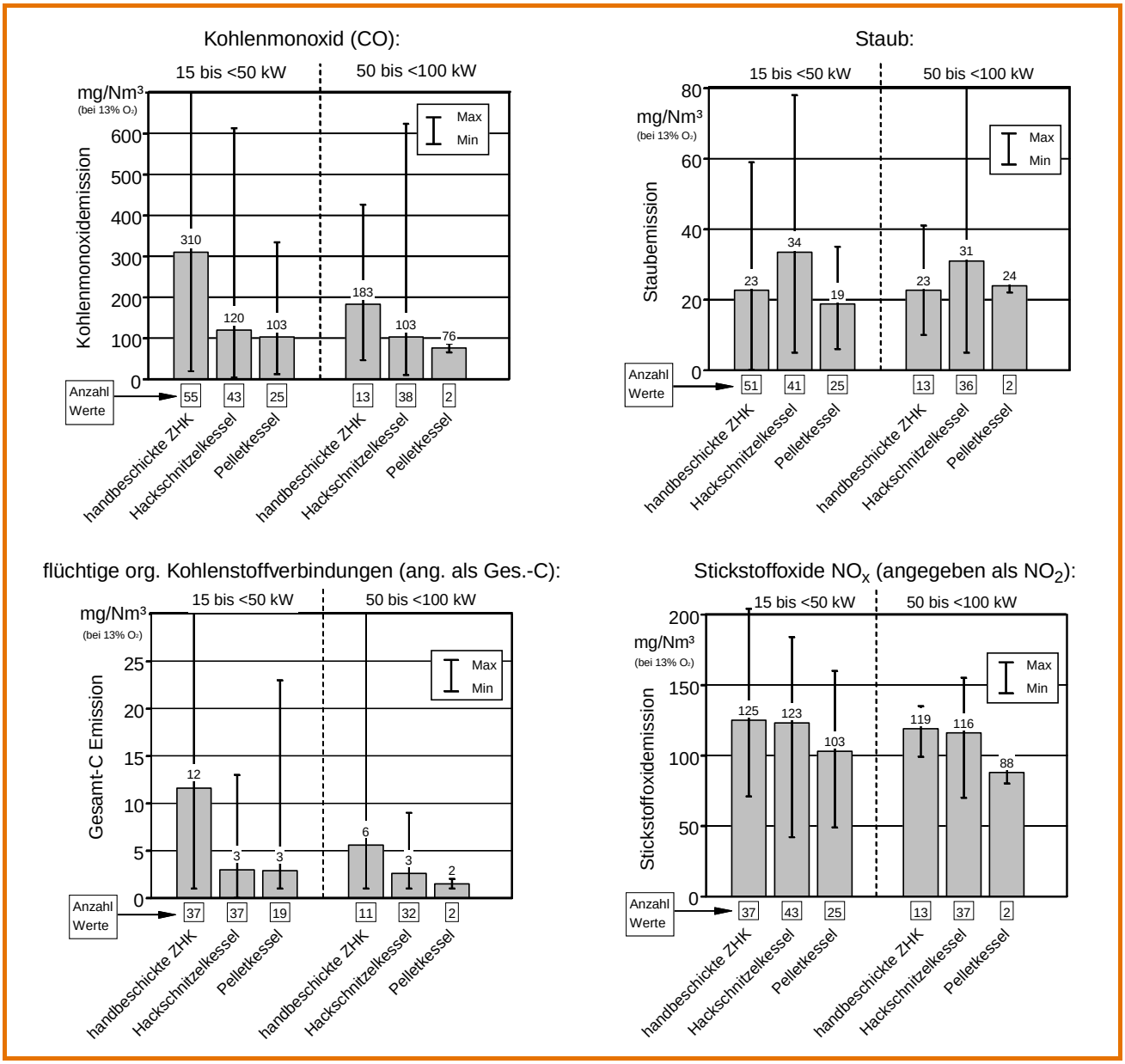


Abb. 7.7: Schadstoffemissionen von Zentralheizungskesseln (ZHK) für Holzbrennstoffe. Quelle: Auswertung von Prüfberichten verschiedener Hersteller seit 1991 (Hackschnitzel-ZHK), 1993 (handbeschickte ZHK) bzw. 1997 (Pellet-ZHK)

rungen beim Kesselwirkungsgrad der Feuerungen eingetreten (Kapitel 7.1).

Flüchtige organische Kohlenstoffverbindungen. Analog zum CO-Ausstoß verhalten sich auch die Emissionen der flüchtigen organischen Kohlenstoffverbindungen (Gesamt-C), da es sich in beiden Fällen um Produkte einer unvollständigen Verbrennung handelt (vgl. Kapitel 5.2). Wie beim CO ist auch hier bei größeren Anlagen mit höherer Nennwärmeleistung eine Abnahme des Schadstoffausstoßes festzustellen (Abb. 7.7). Das Gleiche gilt für den Auslastungsgrad der Feuerung, das heißt, dass die in Abb. 7.7. dargestellten CO- und Gesamt-C-Emissionen deutlich zunehmen, sobald die Anlagen mit gedrosselter Leistung, d. h. in Teillast oder gar bei kleinster Wärmeleistung, betrieben werden.

Staubemissionen. Der beim CO und Gesamt-C festgestellte Zusammenhang mit der Leistung und der Anlagenauslastung gilt bei den Staubemissionen nicht, diese werden statt dessen von anderen Faktoren wie Bewegung im Glutbett, Aschegehalt im Brennstoff oder vom Vorhandensein von Ablagerungszonen bestimmt. Tendenziell weisen Hackschnitzelfeuerungen höhere Staubemissionen auf als handbeschickte Scheitholzkessel, bei denen sich das Glutbett weitgehend in Ruhe befindet. Ein solches ruhendes Glutbett

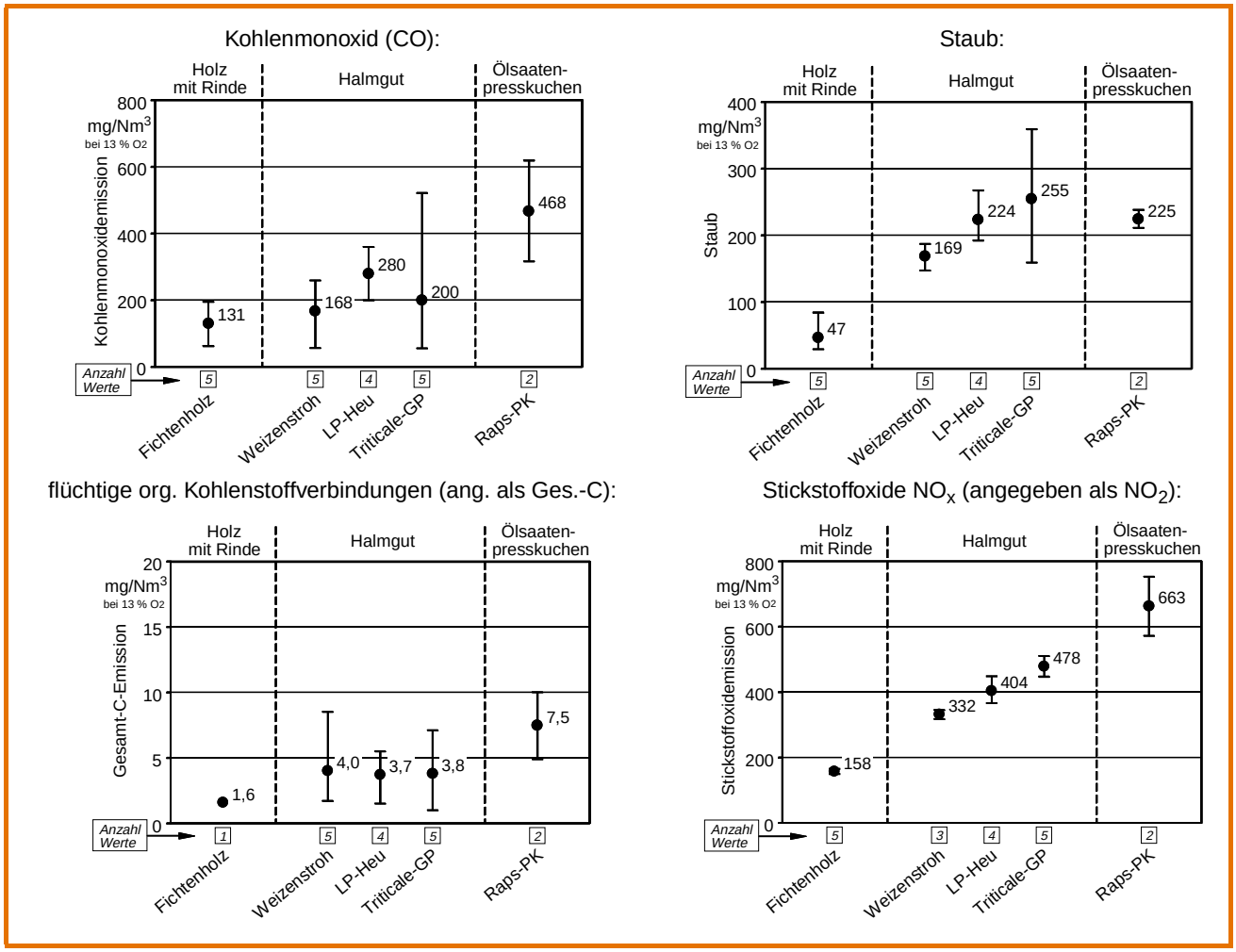


Abb. 7.8: Beispiele für Schadstoffemissionen von Halmgut- und anderen Brennstoffen in einer halmguttauglichen automatisch beschickten Kleinfeuerungsanlage (Einschubfeuerung 50 kW) bei Nennwärmeleistung /6-36/. LP Landschaftspflege, GP Getreideganzpflanzen, PK Presskuchen

liegt auch bei vielen Pelletkesseln vor, wenn diese als Abwurffeuerung ausgeführt sind, bei denen der Glutbettbereich kaum mechanischen Störungen unterliegt (vgl. Kapitel 6.2.1). Außerdem handelt es sich bei den Holzpellets um einen relativ aschearmen Brennstoff (vgl. Kapitel 4.2.4).

Die Einhaltung des hier geltenden Staubgrenzwerts von 150 mg/Nm^3 (Kapitel 8.5.2) ist nach diesen Prüfergebnissen in der Regel unproblematisch. Allerdings wird der Staubausstoß in hohem Maß auch durch den Wartungszustand und die gewählte Brennstoffqualität beeinflusst. Aus diesem Grund ist in der Praxis die Beanstandungsquote bei den jährlichen Überprüfungsmessungen (Kapitel 8.5.3) relativ hoch. Nach Auskunft des Kaminkehrerhandwerks werden ca. 25 % aller wiederkehrend gemessenen Hackschnitzelfeuerungen wegen Überschreitung des Staubgrenzwertes beanstandet, so dass Nachmessungen veranlasst werden müssen.

NO_x-Emissionen. Für NO_x-Emissionen gelten bei Feuerungen für naturbelassenes Holz im Leistungsbereich bis 1000 kW keine gesetzlichen Grenzwerte (vgl. Kapitel 8.5.2). Wenn der Grenzwert der TA Luft auch bei den kleineren Holzfeuerungen gelten würde, ließe er sich problemlos einhalten, zumal es sich bei den naturbelassenen Holzbrennstoffen um vergleichsweise stickstoffarme Brennstoffe handelt. Das gilt insbesondere für Holzpellets, die in der Regel aus entrindeten Sägereshölzern hergestellt werden (vgl. Kapitel 3.3.4) und daher in Abb. 7.7 tendenziell die geringsten NO_x-Emissionen bei Nennwärmeleistung aufweisen.

In der Praxis liegen die NO_x-Emissionen von Holzfeuerungen tendenziell sogar eher niedriger als in Abb. 7.7 dargestellt, da die Anlagen nicht durchgehend bei Nennwärmeleistung betrieben werden. Anders als bei den CO- und Gesamt-C-Emissionen führen zurückgehende Verbrennungstemperaturen

bei gedrosselter Leistung zu einem verminderten NO_x-Ausstoß /6-21/.

7.2.2.3 Emissionen von Halmgutfeuerungen

Halmgutbrennstoffe wie Stroh, Gras und Ganzpflanzengetreide weisen gegenüber Holzbrennstoffen vielerlei Nachteile auf, die einerseits eine aufwändige und teuere Feuerungstechnik erforderlich machen (Kapitel 6.2.1.4) und andererseits – verglichen mit Holzbrennstoffen – meist mit erhöhten Schadstoffemissionen verbunden sind. Da bei den Halmgutbrennstoffen die Gehalte an emissionsrelevanten Inhaltsstoffen deutlich höher liegen als beim Holz (hier im wesentlichen N, Cl und Asche, vgl. Kapitel 4.1.2), zeigt sich dieser Emissionsanstieg insbesondere bei solchen Schadstoffen, die aus eben diesen Inhaltsstoffen gebildet werden (z. B. NO_x, HCl, Staub). Lediglich bei den CO-Emissionen und den flüchtigen organischen Kohlenstoffverbindungen werden mit Holzbrennstoffen vergleichbare Emissionswerte erzielt (Abb. 7.8), da moderne Feuerungen auch mit Halmgutbrennstoffen einen hohen Gasausbrand erreichen können.

Dagegen steigen aber die Stickstoffoxid-Emissionen bei Halmgutbrennstoffen im Durchschnitt um das Zwei- bis Vierfache gegenüber Holz an (Abb. 7.8). Bei Verwendung von noch stickstoffhaltigeren Brennstoffen wie Getreidekörner oder Ölsaatenpresskuchen kann sich dieser Abstand noch weiter vergrößern. Gesetzliche Emissionsbegrenzungen gelten jedoch erst ab 100 kW Feuerungswärmeleistung (Kapitel 8.5.2). Würden sie auch bei Kleinanlagen bis 100 kW eingeführt, könnten diese Grenzwerte nicht mit allen Halmgutbrennstoffen sicher unterschritten werden.

Noch höher als beim NO_x fällt die Zunahme bei den Staubemissionen aus. Diese erhöhen sich durchschnittlich um das Fünffache, wenn Halmgut- statt Holzbrennstoffe eingesetzt werden (Abb. 7.8). Hierbei stellt weniger der absolute Gehalt der im Brennstoff enthaltenen Asche sondern vielmehr dessen Beschaffenheit die Hauptursache für den Anstieg dar. Halmgutaschen sind sehr feinkörnig und weisen zudem eine niedrige Dichte auf /6-24/, so dass sie im Abgasstrom leicht mitgetragen werden, anstatt im Aschebett oder im Wärmetauscher abgeschieden zu werden. Das ist auch der Grund, warum die Feinst-Staubanteile des Abgases („Submikronpartikel“ < 1 µm) den größten Teil der Staubemission bilden /6-36/, und warum die Staubfracht mit einfachen und kostengünstigen Maßnahmen wie dem Einbau eines Fliehkraftabscheiders (Multizyklon) nicht nennenswert reduziert werden kann. Ohne spezielle Entstaubungsmaßnahmen, die auch bei den Feinstäuben wirksam sind (z. B. Gewebefilter), lässt sich somit der Staubgrenzwert in der Regel kaum einhalten. Derartige Entstaubungsanlagen sind aber für Anlagen der Leistungsklasse bis 100 kW mit wirtschaftlich nicht vertretbaren Mehrkosten verbunden, so dass sie derzeit kaum verwendet werden. In der Praxis haben diese Probleme dazu geführt, dass halmguttaugliche Feuerungen primär mit Hackschnitzeln betrieben werden und nur gelegentlich auch betrieblich anfallende Brennstoffe wie Häckselgut, Saatgutreinigungsabgänge, Bruchkörner oder Mühlennebenprodukte zum Einsatz kommen.

Auch eine Pelletierung des Halmgutbrennstoffs kann nicht als Lösungsweg bei der Staubproblematik angesehen werden. Entsprechende Messungen zeigen, dass dadurch keine sichere Absenkung der Staubemissionen eintritt /6-36/. Gleichwohl kann die Pelletierung (Kapitel 3.3.4.2) auf Grund der Vereinfachung der Beschickungsprozesse als eine Art Schlüsseltechnologie für kleinere Strohfeuerungen angesehen werden, zumal mit dieser Brennstoffform stabilere Betriebszustände auf niederem CO-Emissionsniveau erreicht werden /6-36/. Weitere positive Effekte sind durch Verwendung von schadstoffmindernden Zuschlagsstoffen bei der Pelletierung denkbar, allerdings liegen hierzu derzeit noch keine gesicherten Erkenntnisse vor.

Ähnlich gering ist der gesicherte Kenntnisstand über die Emissionen absätzig beschickter Ganzballenfeuerungen (Kapitel 6.2.1.4), die in Deutschland als Kleinfeuerungen derzeit kaum eingesetzt werden. Die genannten grundlegenden Probleme mit Halmgutbrennstoffen lassen sich jedoch auch hier nur schwer beherrschen. Zu diesen Problemen zählen neben den diskutierten klassischen Schadstoffen auch die hochtoxischen organischen Kohlenstoffverbindungen wie aromatische Kohlenwasserstoffe (z. B. PAK) oder chlorhaltige Schadstoffe (z. B. HCl, Dioxine und Furane). Letztere stellen auf Grund des erhöhten Chlorgehaltes gerade bei Halmgutbrennstoffen ein erhöhtes Umwelt- und Gesundheitsrisiko dar /6-36/.

7.3 Aschequalität und -verwendung

Je nach verwendetem Brennstoff fallen zwischen 0,5 und 10 % der Brennstoffmasse als Verbrennungsrückstand (Asche, Schlacke) an. Er muss entweder entsorgt oder verwertet werden. Die Zusammensetzung und Verwendung dieser Rückstände hängen von unterschiedlichen Einflussgrößen ab, die nachfolgend vorgestellt werden.

Aschezusammensetzung. In der Asche finden sich viele der in Kapitel 4.1 genannten Elemente wieder. Sie besteht vorwiegend aus Kalzium (Ca), Magnesium (Mg), Kalium (K), Phosphor (P) und Natrium (Na). Die mittlere Zusammensetzung beispielsweise der Grobasche von Holz liegt bei rund 42 % CaO, ca. 6 % K_2O, etwa 6 % MgO, ca. 3 % P_2O_5 und rund 1 % Na_2O sowie kleinere Mengen an Eisen und Mangan /6-24/. Bei Stroh- und Getreideganzpflanzenaschen sind die Anteile von K_2O und P_2O_5 höher und die Schwermetallgehalte sind niedriger /6-36/; damit erhöht sich ihr Düngewert.

Neben der Brennstoffart hängt die Aschezusammensetzung in entscheidendem Maß auch vom Anfallort innerhalb der Feuerungsanlage ab. Von größeren Feuerungsanlagen, die über sekundäre Entstaubungseinrichtungen verfügen, ist bekannt, dass die Aschen – je nachdem ob sie im Glutbett, im Zyklon (Fliehkraftabscheider) oder im Filter (Gewebe- oder Elektrofilter) anfallen – eine sehr unterschiedliche Qualität aufweisen. Hier nimmt der Schadstoffgehalt von der Bettasche (Feuerraum) über den Zyklon bis zum Filter deutlich zu, während die Staubkorngrößen abnehmen.

Kleinanlagen sind allerdings nur selten mit einer solchen Staubabscheidetechnologie ausgestattet. Hier findet eine Separierung der Aschen nur bei der periodischen Reinigung statt. Der typische Anteil der Feuerraumasche beträgt 84 bis 98 % des Gesamtascheanfalls; die im Wärmeübertrager abgeschiedene Asche liegt dagegen nur bei 2 bis 16 % und die Asche aus dem Kaminsystem bei 2 bis 4 % (bei Scheitholzfeuerungen /6-35/) bzw. bei automatisch beschickten Kleinanlagen sogar bei weniger als 0,4 % der Gesamtaschemenge (Abb. 7.9).

Analog zu den Anlagen mit Entstaubungseinrichtung erweisen sich die abgeschiedenen Flug- und Feinstflugaschen aus dem Wärmetauscher bzw. aus

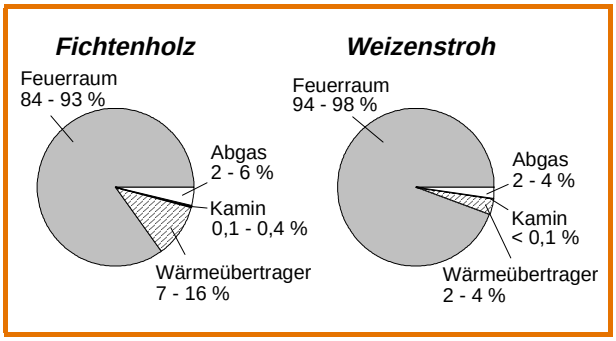


Abb. 7.9: Zuordnung des Ascheanfalls nach Abscheideberreichen in einer automatisch beschickten Kleinfeuerungsanlage (50 kW) ohne sekundäre Staubabscheidung (nach /6-36/)

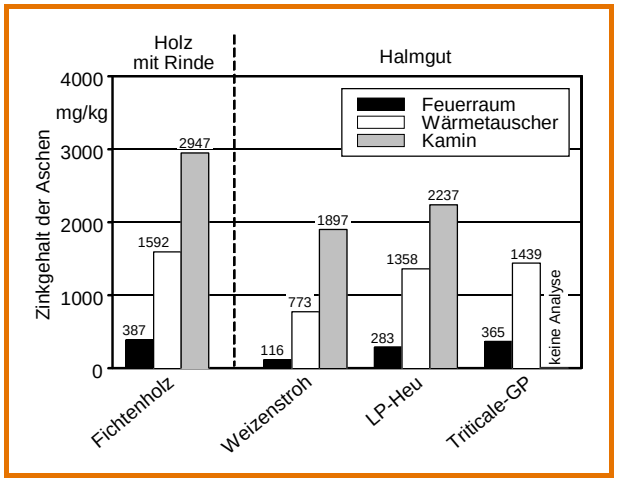


Abb. 7.10: Schwermetallanfall in einer automatisch beschickten Kleinfeuerung (50 kW) am Beispiel des Zinkgehalts in Aschen aus verschiedenen Abscheidungsbereichen bei unterschiedlichen Biomassebrennstoffen (nach /6-36/)
LP Landschaftspflege, GP Getreideganzpflanzen

dem Kaminsystem ebenfalls als besonders stark schwermetallbelastet. Das wird in Abb. 7.10 am Beispiel von Zink (Zn) ersichtlich. Dieser Zusammenhang ist durchweg auch auf die übrigen Schwermetalle übertragbar; er gilt auch für die hochtoxischen Schadstoffe wie PAK (Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe) oder PCDD/F (Dioxine und Furane) /6-36/.

Ascheverwendung. Die Separierung der kritischen Aschefraktionen (z. B. der Wärmetauscheraschen) ist nicht immer problemlos möglich. Das gilt insbesondere dann, wenn die Anlage mit einer mechanischen oder automatischen Reinigung der Wärmetauscherzüge ausgestattet ist, bei der die Flugasche mit der Bettasche wieder vermengt wird. Bei Holzfeuerungen kleinerer Leistung wird daher empfohlen, die gesamte (abgekühlte) Asche in den Hausmüll zu geben, da eine Verwendung als Dünger wegen der möglichen Schadstoffbelastung des Bodens und der Pflanzen nicht vertretbar ist.

Bei Aschen aus Halmgutfeuerungen fällt dagegen eine um ein Vielfaches höhere Aschemenge mit tendenziell geringerer Schwermetallkonzentration an; gleichzeitig ist auch der Düngerwert dieser Aschen höher als der von Holzaschen. Auch hier gilt aber, dass eine Verwendung als Dünger nicht in jedem Fall problemlos zu empfehlen ist, wenngleich die Ausbringung auf landwirtschaftliche Flächen bei größeren Heizwerken (mit Entstaubungsanlagen) gängige Praxis ist.

Rechtliche Anforderungen und Vorschriften

8.1 Zulassung von Feuerungsanlagen

Maßgeblich für die generelle Verwendbarkeit von Bauprodukten wie Feuerungsanlagen sind in Deutschland die Landesbauordnungen und die Feuerungsverordnungen der Länder. Damit die darin festgelegten Regeln zwischen den Bundesländern möglichst wenig abweichen, wurde eine sogenannte „Musterbauordnung“ (MBO) erlassen /8-1/. Darin sind die für alle Bundesländer angestrebten Standards festgelegt, bevor sie in Länderverordnungen umgesetzt werden.

Ü-Zeichen und CE-Kennzeichnung. Nach der Musterbauordnung dürfen Bauprodukte wie z. B. Feuerungsanlagen nur verwendet werden, wenn sie entweder das nationale Übereinstimmungszeichen „Ü-Zeichen“ oder das europäische Konformitätszeichen CE tragen. Damit wird die Übereinstimmung mit den geltenden Richtlinien für die Produkte durch eine entsprechende Kennzeichnung dokumentiert. Im Gegensatz zu freiwilligen Zeichen handelt es sich beim Ü-Zeichen bzw. CE-Zeichen (Abb. 8.1) also um ein notwendiges Zeichen, welches für das Inverkehrbringen eines Heizkessels erforderlich ist.

Die Gestaltung und Anbringung des Ü-Zeichens ist in der Übereinstimmungszeichen-Verordnung desjenigen Landes geregelt, in dem der Hersteller seinen Sitz hat. Das Ü-Zeichen muss die Daten des Herstellers, die Prüfgrundlage (bei Normkonformität die DIN/EN-Nummer, sonst die Zulassungsnummer) und die Prüfstelle nennen.



Abb. 8.1: Beispiele für ein Ü-Zeichen und ein CE-Zeichen

Das CE-Zeichen darf auf Produkten angebracht werden, die einer in nationales Recht umgesetzten EG-Richtlinie entsprechen und zusätzlich die wesentlichen Anforderungen mitgeltender EG-Richtlinien erfüllen. Das CE-Zeichen ist nur ein Verwaltungszeichen (kein Qualitätszeichen) und hat als Marktzulassungszeichen den Charakter eines Reisepasses /8-14/.

Für die Zulassung von Feuerungsanlagen sind vor allem die Maschinenrichtlinie, die Richtlinie über elektromagnetische Verträglichkeit und die Niederspannungsrichtlinie von Bedeutung. Gemäß dieser Richtlinien ist eine EG-Konformitätserklärung erforderlich. Diese wird vom Hersteller selbst ausgestellt. Er ist außerdem verpflichtet, das CE-Zeichen als sichtbares Zeichen der Konformität auf dem Produkt anzubringen. Die Konformitätserklärung ist in der Sprache des Verwendungslandes auszustellen und beinhaltet Name und Anschrift des Herstellers, eine Beschreibung des Produktes (Fabrikat, Typ, Seriennummer etc.) und alle einschlägigen Bestimmungen, denen das Produkt entspricht (bei Heizkesseln für feste Brennstoffe unter anderen der DIN EN 303-5 /8-8/).

Freiwillige Zeichen. Anbieter oder Hersteller, die sich einer freiwilligen Prüfung ihrer Feuerungsanlage unterzogen haben (z. B. nach DIN EN 303-5) können dadurch oftmals ein spezielles Prüfkennzeichen der betreffenden Prüfstelle oder Zertifizierungseinrichtung führen. Derartige Prüfzeichen werden von verschiedenen Prüfeinrichtungen (z. B. TÜV, DIN CERTCO, Bundesanstalt für Landtechnik in Wieselburg) vergeben. Oftmals wird darin lediglich die Übereinstimmung mit den Anforderungen der jeweiligen Norm

noch einmal von unabhängiger Stelle festgestellt. Es ist aber auch möglich, dass die Einhaltung weitergehender Anforderungen, die im Rahmen eines zusätzlichen Anforderungskatalogs festgelegt wurden, durch ein solches Zeichen bestätigt wird. Auch für Holzfeuerungsanlagen werden derzeit entsprechende Gütesiegel vorbereitet bzw. eingeführt.

Relevante Normen. Für Feststofffeuerungen gelten eine Vielzahl von Normen aus dem Bereich der Feuerungs- oder Kesselprüfung, elektrischen Sicherheit sowie der Regel- und Steuertechnik /8-17/. Sie können hier nicht erschöpfend erläutert werden. Nachfolgend werden lediglich einige Ausführungen zu der für Heizkessel wichtigsten Norm, der DIN EN 303-5 /8-8/ gemacht. Diese Norm gilt für Holz-Zentralheizungskessel im kleineren Leistungsbereich und legt einen inzwischen europaweit einheitlichen Anforderungs- und Prüfstandard fest. Eine vergleichbare deutsche Norm wird derzeit auch für Pelletöfen (als Einzelfeuerstätten) erarbeitet (DIN 18894 /8-9/).

DIN EN 303-5 (Heizkessel). Sie betrifft alle Holzfeuerungskessel mit einer Nennwärmeleistung bis 300 kW, die mit Über- oder Unterdruck im Brennraum, mit Naturzug oder Gebläse und mit Handbeschickung oder automatischer Beschickung arbeiten, wobei als Wärmeträgermedium Wasser verwendet wird, welches einem zulässigen Betriebsdruck bis 6 bar und einer zulässigen Betriebstemperatur bis 100°C ausgesetzt ist. Als Prüfbrennstoffe kommen unter anderem Stückholz mit einem Wassergehalt bis 25 % (Brennstoffart A), Hackgut mit einem Wassergehalt zwischen 15 % und 35 % (B1) oder Hackgut mit einem Wassergehalt von mehr als 35 % (B2), Presslinge wie Briketts oder Pellets (C) oder Sägespäne (D) in Frage.

Bei der heiztechnischen Prüfung gelten bestimmte einheitliche Prüfvorschriften und Messverfahren, die eine möglichst hohe Vergleichbarkeit der Messwerte sicherstellen sollen. Durch die heiztechnische Prüfung muss die Einhaltung bestimmter Mindestanforderungen für drei verschiedene in der Norm definierte Kesselklassen nachgewiesen werden.

Beispielsweise muss der Kesselwirkungsgrad für Kessel der Klasse 3 (nur solche Kessel entsprechen in Deutschland den Anforderungen der 1. BImSchV) einen Mindestwert überschreiten, der sich aus Gleichung (8-1) ergibt, wobei η_K den Kesselwirkungsgrad in % und Q_N die Nennwärmeleistung in kW darstellen.

$$\eta_K = 67 + 6 \log Q_N \qquad (8\text{-}1)$$

Tabelle 8.1: Emissionsgrenzwerte für Heizkessel der Klasse 3 für biogene Festbrennstoffe nach DIN EN 303-5 /8-8/ (Die Anforderungen wurden hier auf die in Deutschland üblichen Angaben bei 13 % O_2 umgerechnet)

Beschickung	Nenn-Wärmeleistung kW	Emissionsgrenzwerte mg/Nm³ bei 13 % O_2 CO	C_{org}	Staub
von Hand	bis 50	3635	109	109
	> 50 bis 150	1818	73	109
	> 150 bis 300	872	73	109
automatisch	bis 50	2181	73	109
	> 50 bis 150	1818	58	109
	> 150 bis 300	872	58	109

Bei einer Nennwärmeleistung von beispielsweise 25 kW wird somit ein Mindestwirkungsrad von 75,4 % gefordert.

Daneben gelten bestimmte Emissionsgrenzwerte, sie sind in Tabelle 8.1 angegeben. Diese Emissionswerte werden von Holz-Heizkesseln bei entsprechenden Prüfungen nach DIN EN 303-5 meist deutlich unterschritten (vgl. hierzu Kapitel 7.2.2).

Unabhängig von der Norm sind in jedem Fall die nationalen Emissionsgrenzwerte einzuhalten. Für Deutschland werden sie in Kapitel 8.5.2 dargestellt.

Neben diesen Emissions- und Wirkungsgradvorgaben wird für die meisten Heizkessel eine Mindesttemperatur der Abgase vor dem Eintritt in den Schornstein gefordert; dadurch soll eine Taupunktunterschreitung im Kaminsystem sicher vermieden werden. Gemäß DIN EN 303-5 muss diese Temperatur um mindestens 160 Kelvin über der Umgebungstemperatur (Raumtemperatur) liegen. Liegt die Raumtemperatur während der Prüfung beispielsweise bei 20 °C, beträgt die geforderte Mindestabgastemperatur demnach 180 °C. Eine Unterschreitungen der Mindesttemperatur ist nur zulässig, wenn der Feuerungshersteller einen speziellen hierfür geeigneten Kamintyp explizit vorschreibt.

Daneben sind eine Vielzahl weiterer sicherheitstechnischer und heiztechnischer Anforderungen der DIN EN 303-5 zu erfüllen. Diese betreffen unter anderem die Festigkeit und Verarbeitung (z. B. Werkstoffart, Mindestwanddicke, Ausführung der Schweißarbeiten, Fertigungskontrolle) und Anforderungen an die konstruktive Ausführung (z. B. Vermeidung einer kritischen Erwärmung, Vermeidung des Austritts von Glut, Flammen oder Gasen, Temperaturregelung und -begrenzung, Beschickungseinrichtungen, elektrische Sicherheit, Rückbrandsicherung).

Ebenso ist der maximal zulässige Förderdruck, d. h. der Überdruck am Abgasstutzen des Kessels, in Abhängigkeit von der Nennwärmeleistung oder nach Herstellerangabe einzuhalten. Bei handbeschickten Holzkesseln muss eine Mindestbrenndauer von 2 Stunden für eine vom Hersteller angegebene Brennstofffüllung und bei automatisch beschickten Holzkesseln von mindestens 6 Stunden im Heizbetrieb bei Volllast gewährleistet sein. Die kleinste Wärmeleistung darf bei automatisch beschickten Heizkesseln maximal 30 % der Nennwärmeleistung betragen, bei handbeschickten Heizkesseln ist eine deutlich höhere Teilleistung zulässig (eventuell in Verbindung mit einem Pufferspeicher).

Die DIN EN 303-5 schreibt auch vor, dass Heizkessel mit einem Typenschild versehen werden. Darauf müssen folgende Informationen mindestens enthalten sein:

- Name und Firmensitz des Herstellers, Herstellerzeichen,
- Typ (Handelsbezeichnung),
- Herstellnummer und Baujahr (Codierung zulässig)
- Nennwärmeleistung bzw. Wärmeleistungsbereich für jede zugelassene Brennstoffart,
- Kesselklasse (nach DIN EN 303-5 sind 3 Klassen möglich, in Deutschland ist nur die Klasse 3 zulässig),
- maximal zulässiger Betriebsdruck in bar,
- maximal zulässige Betriebstemperatur in °C,
- Wasserinhalt,
- Elektroanschluss (V, Hz, A), Leistungsaufnahme in W.

Außerdem wird eine Bedienungsanleitung verlangt, in der mindestens die folgenden Informationen enthalten sein müssen:

- Bedienung des Kessels, gefahrloses Beschicken, Öffnen der Türen,
- Reinigungsanweisung, Reinigungsintervalle,
- Verhalten bei Störungen,
- Wartung, Wartungsintervalle,
- Brennstoffarten, zulässige Wassergehalte, Brennstoffstückgröße, Schichtrichtung bei Scheitholz,
- Maximale Füllhöhe im Füllraum,
- Brenndauer für die zugelassenen Brennstoffarten bei Nennwärmeleistung.

Für den Installateur ist außerdem eine Montageanleitung mit bestimmten technischen Informationen vorgeschrieben. Zusätzlich können noch Angaben aus anderen Normanforderungen notwendig sein.

8.2 Bauliche Anforderungen

Die Regeln für den Einbau einer Feststofffeuerung sind in der jeweiligen Länder-Feuerungsverordnung festgelegt. Diese folgt einer „Musterfeuerungsverordnung“ /8-11/ die einen möglichst einheitlichen Standard aller Länder-Feuerungsverordnungen in Deutschland sicherstellt. Geringe Abweichungen zu den im Folgenden dargestellten Anforderungen zwischen den Bundesländern sind möglich, daher empfiehlt sich in jedem Fall eine rechtzeitige Abstimmung mit dem zuständigen Kaminkehrer.

8.2.1 Verbrennungsluftversorgung

Bei raumluftabhängigen Feuerstätten, d. h. Feuerungen, die nicht über einen geschlossenen Luftkanal mit der Außenluft verbunden sind (gilt für fast alle Holzfeuerungen), ist eine ausreichende Verbrennungsluftversorgung sicherzustellen. Diese Forderung ist erfüllt wenn sich eine Tür ins Freie oder ein Fenster, das geöffnet werden kann, im Aufstellraum befindet oder dessen Rauminhalt bei mindestens 4 m^3 je kW Gesamtnennwärmeleistung liegt, wobei – bis zu einer Gesamtnennwärmeleistung von 35 kW – auch eine Verbindung zu anderen Räumen mit Außenluftzutritt ausreicht (d. h. über Undichtigkeiten der Türen, Lüftungsgitter oder Durchlasselemente). Für Feuerstätten über 35 kW bis 50 kW werden dagegen eine oder zwei ins Freie führende Öffnungen oder eine entsprechende Leitung mit mindestens 150 cm^2 bzw. 2 x 75 cm^2 gefordert. Bei Feuerungen über 50 kW erhöht sich der geforderte Lüftungsquerschnitt um 2 cm^2 für jedes zusätzliches Kilowatt Nennwärmeleistung (Belüftungsanforderung nach FeuV §3).

8.2.2 Aufstellort der Feuerung und dessen Nutzung als Brennstofflager

Aufstellort von Holzfeuerungen bis 50 kW. Für Einzelfeuerstätten und kleinere Zentralheizungsanlagen werden zum Teil geringere Anforderungen an den Aufstellort definiert. Sie sind in Abb. 8.2 dargestellt und werden nachfolgend zusammengestellt (vgl. hierzu auch Tabelle 8.2).

- Feuerstätten dürfen nicht in Treppenräumen (außer in Wohngebäuden mit nicht mehr als zwei Wohnungen), in notwendigen Fluren und in Garagen aufgestellt werden.
- In Räumen mit Ventilatoren, wie Lüftungs- oder Warmluftheizungsanlagen, Dunstabzugshauben oder Abluft-Wäschetrocknern dürfen Feuerstätten

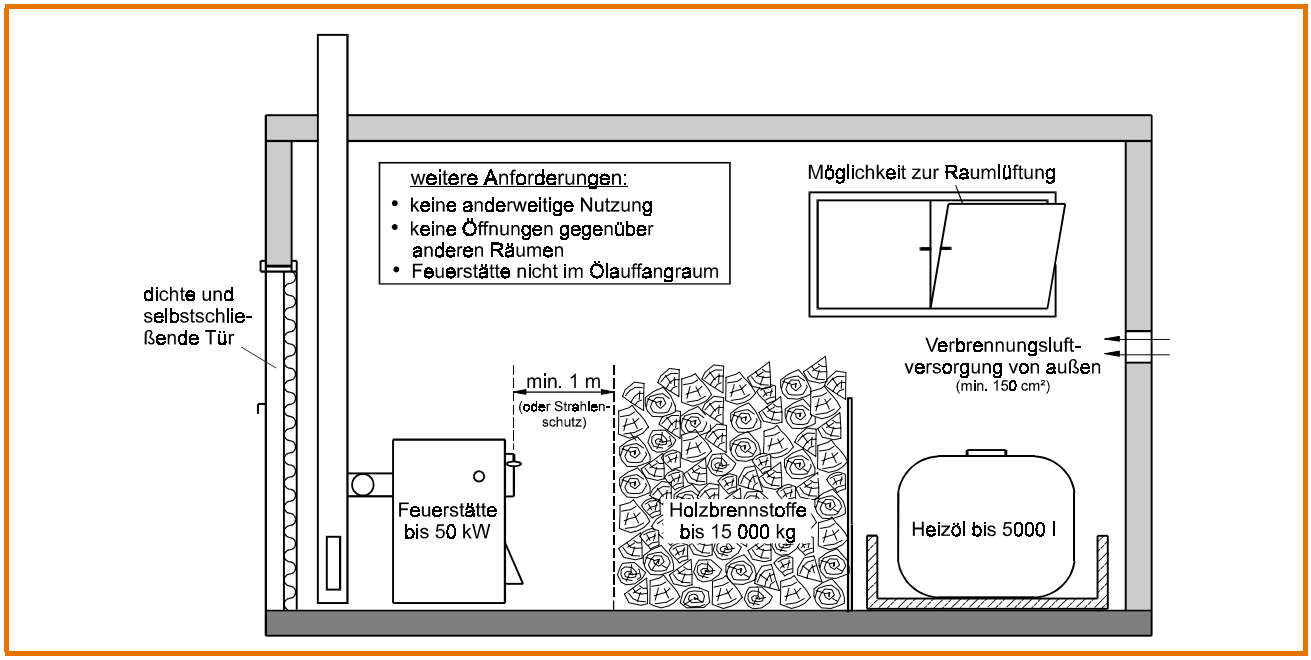


Abb. 8.2: Anforderung und Lagernutzung eines Aufstellraums für eine Holzfeuerstätte bis 50 kW Nennwärmeleistung (nach FeuV /8-11/)

nur unter bestimmten Bedingungen aufgestellt werden, nämlich wenn ein gleichzeitiger Betrieb der Feuerstätten und der luftabsaugenden Anlagen durch Sicherheitseinrichtungen verhindert wird, die Abgasführung durch besondere Sicherheitseinrichtungen überwacht wird.

- Die Feuerstätten müssen von Bauteilen aus brennbaren Baustoffen und von Einbaumöbeln so weit entfernt oder so abgeschirmt sein, dass an diesen bei Nennwärmeleistung der Feuerstätten keine höheren Temperaturen als 85 °C auftreten können. Andernfalls muss ein Abstand von mindestens 40 cm eingehalten werden.
- Vor den Feuerungsöffnungen sind Fußböden aus brennbaren Baustoffen durch einen Belag aus nichtbrennbaren Baustoffen zu schützen. Der Belag muss sich nach vorn auf mindestens 50 cm und seitlich auf mindestens 30 cm über die Feuerungsöffnung hinaus erstrecken.
- Bauteile aus brennbaren Baustoffen müssen – soweit sie im Strahlungsbereich liegen – von den Feuerraumöffnungen offener Kamine nach oben und nach den Seiten einen Abstand von mindestens 80 cm haben. Bei Anordnung eines beiderseits belüfteten Strahlungsschutzes genügt ein Abstand von 40 cm.

Heizräume für Feststofffeuerungen (über 50 kW). Ab einer Gesamt-Nennwärmeleistung von mehr als 50 kW sind für Holzfeuerungen besondere Räume (Heizräume) erforderlich, sofern es sich nicht um freistehende Gebäude handelt, die allein dem Betrieb der Feuerung und der Brennstofflagerung dienen (z. B. Kesselhäuser). Die für Holzfeuerungen geltenden Anforderungen an Heizräume werden nachfolgend zusammengestellt (vgl. hierzu auch Tabelle 8.2):

- Die Heizräume dürfen nicht anderweitig genutzt werden (außer mit Wärmepumpen, Blockheizkraftwerken, ortsfesten Verbrennungsmotoren sowie zur Brennstofflagerung) und dürfen nicht mit Aufenthaltsräumen (außer für Betriebspersonal) oder mit Treppenräumen in unmittelbarer Verbindung stehen.
- Heizräume müssen mindestens einen Rauminhalt von 8 m^3 und eine lichte Höhe von 2 m haben. Sie sollen einen Ausgang besitzen, der ins Freie oder in einen Flur führt, der die Anforderungen an notwendige Flure erfüllt. Die Türen müssen in Fluchtrichtung aufschlagen.
- Mit Ausnahme nichttragender Außenwände müssen Wände, Stützen und Decken über und unter ihnen feuerbeständig sein. Deren Öffnungen müssen, soweit sie nicht unmittelbar ins Freie führen, mindestens feuerhemmende und selbstschließende Abschlüsse haben. Trennwände zwischen Heizräumen und den zum Betrieb der Feuerstätten gehörenden Räumen mit gleichen Merkmalen sind hiervon ausgenommen.
- Heizräume müssen zur Raumlüftung jeweils eine obere und eine untere Öffnung ins Freie mit einem Querschnitt von mindestens je 150 cm^2 oder Leitun-

Tabelle 8.2: Wegweiser zu den wichtigsten Anforderungen der Feuerungsverordnung (FeuV /8-11/) an den baulichen Raum eines Aufstell- oder Heizraumes für Feststofffeuerungen je nach Feuerung und Lagerraumnutzung

Nutzungsart	zulässige Varianten einer kombinierten Heizraum-/Brennstofflagerraum-Nutzung								
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
nur Lager bis 15 000 kg (Holz)	X		X	X	X	X	X	X	X
nur Lager über 15 000 kg (Holz)		X							
zusätzlich bis 1 000 l Heizöllagerung			X		X				
zusätzlich bis 5 000 l Heizöllagerung				X		X	X[a]	X[a]	X
Feuerstätte für Holz bis 50 kW					X	X		X	
Feuerstätte für Holz über 50 kW									X
Feuerstätte für Öl oder Gas über 50 kW							X[a]	X[a]	
Anforderungen gemäß Feuerschutzverordnung (FeuV):									
keine Anforderungen an Wände, Decken, Türen und Nutzung	X		X		X				
Raum muss gelüftet werden können				X		X	X	X	X
Verbrennungsluftversorgung nach FeuV §3					X	X	X	X	X
Raumlüftungsanforderungen nach FeuV §6, (4)									X
dichte und selbstschließende Türen				X		X	X	X	
keine Öffnungen gegenüber anderen Räumen				X		X	X	X	
keine anderweitige Nutzung		X		X[b]		X[b]	X[b]	X[b]	X[b]
keine Leitungen durch die Wände		X							
Wände, Decken u. Stützen feuerbeständig (F90)		X							X
Türen selbstschließend und feuerhemmend (F30)		X							X
Türen öffnen in Fluchtrichtung									X
Abstand Feuerstätte zum Brennstofflager: 1 m (oder Strahlenschutz)					X	X	X	X	X
Feuerstätte nicht im Ölauffangraum							X	X	X

a. Werden im Heizungsraum (ab 50 kW) mehr als 1000 l Heizöl gelagert, muss beim Notschalter für den Heizkessel eine Absperrvorrichtung für die Heizölzufuhr vorhanden sein.
b. außer zur Brennstofflagerung oder mit Wärmepumpen, Blockheizkraftwerken und ortsfesten Verbrennungsmotoren

gen ins Freie mit strömungstechnisch äquivalenten Querschnitten haben (Belüftungsanforderung nach FeuV §6, Abs.4).
- Lüftungsleitungen für Heizräume müssen eine Feuerwiderstandsdauer von mindestens 90 Minuten haben, soweit sie durch andere nicht zum Betrieb der Feuerstätten gehörende Räume führen. Die Lüftungsleitungen dürfen mit anderen Lüftungsanlagen nicht verbunden sein und nicht der Lüftung anderer Räume dienen.

Brennstofflagerräume. Bis zu einer Menge von 15 000 kg dürfen Holzbrennstoffe in einem Gebäude oder Brandabschnitt ohne besondere Anforderungen an den Lagerraum bevorratet werden. Das entspricht einer Menge von etwa
- 31 Raummeter (Rm) Buchenscheitholz bzw. 43 Rm Fichtenscheitholz (jeweils lufttrocken),
- 53 m^3 Buchenhackgut bzw. 74 m^3 Fichtenhackgut (jeweils lufttrocken),
- 25 m^3 Holzpellets.

Im gleichen Lagerraum ist auch noch zusätzlich die Lagerung von bis zu 5 000 l Heizöl erlaubt. Das gilt auch für die Lagerung in Aufstell- oder Heizräumen (Tabelle 8.2).

Bei größeren Brennstoffmengen müssen spezielle Brennstofflagerräume mit feuerbeständigen Wänden, Stützen und Decken (F 90) verwendet werden (FeuV §12 /8-11/); durch deren Decken und Wände dürfen auch keine Leitungen geführt werden (ausgenommen Leitungen, die zum Betrieb dieser Räume erforderlich sind sowie Heizrohr-, Wasser- und Abwasserleitungen). Die Türen dieser speziellen Brennstofflagerräume (außer Türen ins Freie) müssen mindestens feuerhemmend und selbstschließend sein.

8.2.3 Abgasanlagen

Kamine. Im Gegensatz zu Gas oder Heizölfeuerungen, bei denen auch einfachere Abgasleitungen verwendet werden dürfen, müssen die Abgase aus Feststofffeuerungen in Kamine (Schornsteine) eingeleitet werden. Dabei dürfen mehrere Feuerstätten an einen gemeinsamen Kamin nur unter bestimmten Bedingungen angeschlossen werden (FeuV §7 /8-11/), und zwar wenn

- durch die Bemessung der lichten Querschnittsfläche und der Höhe die einwandfreie Ableitung der Abgase für jeden Betriebszustand sichergestellt ist (Vermeidung von gefährlichen Überdrücken gegenüber Räumen) und
- bei Ableitung der Abgase unter Überdruck (d. h. im Gebläsebetrieb) die Übertragung von Abgasen zwischen den Aufstellräumen ausgeschlossen ist und auch kein Austritt von Abgasen über andere nicht in Betrieb befindliche Feuerstätten stattfinden kann.

Gemeinsame Kaminbenutzung. Die gemeinsame Nutzung eines Kamins für eine Öl- oder Gasfeuerung mit einer Feststofffeuerung ist prinzipiell möglich, sofern ein gleichzeitiger Betrieb ausgeschlossen ist. Allerdings sind die Anforderungen an den lichten Querschnitt des Kamins bei den genannten Brennstoffen unterschiedlich, beispielsweise werden für Heizöl- oder Erdgasfeuerungen in Einfamilienhäusern meist Kamine mit 12 bis 14 cm Innendurchmesser verwendet, während für Holzfeuerungen meist 18 bis 20 cm sinnvoll sind (gilt im Bereich zwischen 25 bis 50 kW Nennwärmeleistung). Bei zu großen Querschnitten können die Mindestanforderungen an die Abgasgeschwindigkeit im Kamin nicht erfüllt werden (vgl. Kapitel 6.3). Diese Mindestgeschwindigkeit muss auch bei Ausfall des gegebenenfalls vorhandenen Abgasventilators noch gegeben sein (nach DIN 18 160 /8-7/). In Neubauten ist daher für eine kombinierte Nutzung verschiedener Feuerungen stets der Einbau eines mehrzügigen Kamins zu empfehlen (vgl. Tabelle 8.3).

Wenn dennoch eine gemeinsame Schornsteinbenutzung vorgesehen ist (z. B. für mehrere Holzfeuerungen in Altbauten), und die Einhaltung der genannten Mindestvorschriften gewährleistet ist, gelten folgende Regeln (nach DIN 18 160 /8-7/):

- Es dürfen maximal drei Feuerungen (für feste oder flüssige Brennstoffe) mit jeweils maximal 20 kW Nennwärmeleistung angeschlossen sein.
- Die Feuerstätten dürfen nicht gleichzeitig betrieben werden.
- Je Feuerstätte wird ein eigenes Verbindungsstück zum Kamin benötigt.

Tabelle 8.3: Wegweiser zu den (Mindest-)Anforderungen an die Abgasanlage je nach Feuerung(en) (nach FeuV /8-11/ und DIN 18 160 /8-7)

Nutzungsart der Abgasanlage	Varianten einer Kaminbelegung							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Öl-/Gas-Feuerstätte (mit Gebläse)	X						X	X
Holzfeuerung im Naturzug[a]		X		X	X		X	
Holzfeuerung mit Gebläse[b]			X	X		X		X
zusätzliche Holzfeuerung im Naturzug[a, c]					X			
zusätzliche Holzfeuerung mit Gebläse[b, c]						X		
Mindestanforderung:								
Abgasleitung	X							
Einzelkamin (holzfeuerungstauglich)		X	X	X	X	X	X	X
zwei getrennte Kamine (z. B. doppelzügig)						(X)[d]	(X)[d]	(X)[d]
gleichzeitiger Betrieb ist auszuschließen[e]				X		X	X	X
gleichzeitiger Betrieb ist ggf. möglich[f]					X[f]			

a. Einzelfeuerstätte ohne Gebläse (z. B. Kamin- oder Kachelofen) oder Scheitholzkessel im Naturzugbetrieb
b. z. B. Holz-Pelletofen, Gebläse-Scheitholzkessel, Hackschnitzel- und Pellet-Zentralheizungskessel
c. Die Zulässigkeit mehrerer Feuerungen ist individuell auf Grund von Berechnungen nach DIN 4705-3 festzustellen.
d. bei gleichzeitigem Betrieb
e. z. B. durch temperaturgesteuerte Kaminfreigabe. Ein gleichzeitiger Betrieb am Einzelkamin ist hier nur mit baurechtlicher Ausnahmegenehmigung sowie speziellem Sicherheitsgutachten oder Typenprüfung zulässig.
f. Die Betriebssicherheit der Anlage einschließlich schornsteintechnischer Belange muss nachgewiesen sein (siehe Fußnote e).

- Hinter dem Abgasstutzen der Feuerstätte ist eine senkrechte Anlaufstrecke erforderlich, d. h, dass beispielsweise bei einem Kaminofen das Rauchrohr zum Teil noch senkrecht im Wohnraum geführt werden muss.
- Die Verbindungsstücke dürfen nicht in gleicher Höhe in den Schornstein geführt werden (vgl. Kapitel 6.3) und dürfen vom untersten bis zum obersten Verbindungsstück maximal 6,5 m auseinander liegen.

Ein gleichzeitiger Betrieb von Feuerungen, die an einem gemeinsamen Kamin angeschlossen sind, ist dagegen nur unter besonderen Bedingungen zulässig (DIN 18 160 /8-7/). Hierzu bedarf es einer baurechtlichen Ausnahmegenehmigung sowie spezieller Nachweise über die Betriebssicherheit (z. B. Gutachten oder spezielle Typenprüfung für die jeweilige Anlagenkombination).

Auch für den abwechselnden (d. h. nicht gleichzeitigen) Betrieb an einem gemeinsamen Kamin werden in der Praxis meist spezielle Absperr- oder Sicherheitseinrichtungen gefordert. Bei Einzelfeuerstätten ohne Gebläse oder bei Naturzugkesseln genügt in der Regel ein Rauchrohrschieber, der verhindert, dass Abgase über die zweite bzw. dritte nicht in Betrieb befindliche Feuerung in Wohn- oder Aufstellräume gelangen können. In diesem Fall wird der Betreiber vom Kaminkehrer lediglich über die Unzulässigkeit des gleichzeitigen Betriebs informiert (gelegentlich erfolgt dies auch mit schriftlicher Bestätigung über die Kenntnisnahme).

In der Praxis bedeutet diese Regelung beispielsweise, dass ein Kaminofen, der zusammen mit einem Heizölkessel an einen gemeinsamen Kamin angeschlossen ist, nur in der Übergangszeit betrieben werden darf, und auch nur dann, wenn der Heizkessel nicht gleichzeitig zur Brauchwassererwärmung verwendet wird. In solchen Fällen erfolgt die Brauchwassererwärmung nur zu bestimmten Tageszeiten (z. B. nur in den Morgenstunden bei ruhendem Kaminofenbetrieb), oder es ist eine solarthermische Brauchwasserbereitung vorhanden.

Für Gebläsefeuerungen mit gemeinsamer Schornsteinbenutzung genügen solche manuell bedienten mechanischen Sperren im Rauchrohr nicht. Statt dessen wird hier meist über eine Regelung mit Temperaturfühler sichergestellt, dass die zweite Feuerung nicht in Betrieb genommen werden kann, bevor nicht die Abgastemperatur im Verbindungsstück der zuvor abgeschalteten ersten Feuerung unter einen bestimmten Wert (meist 80 °C) gesunken ist. Solche Systeme werden beispielsweise bei kombinierten Kesseln für Scheitholz mit Heizöl bzw. Erdgas verwendet.

Anforderungen an Kamine. Im Unterschied zu Abgasleitungen müssen die für Holzfeuerungen geforderten Kamine (nach FeuV §7 /8-11/)

- gegen Rußbrände beständig sein (d. h. sie müssen auch für das gelegentlich erforderliche gezielte Ausbrennen von Teer- und Rußablagerungen geeignet sein, vgl. Kapitel 8.3),
- in Gebäuden, in denen sie Geschosse überbrücken, eine Feuerwiderstandsdauer von mindestens 90 Minuten haben (F 90),
- unmittelbar auf dem Baugrund gegründet oder auf einem feuerbeständigen Unterbau errichtet sein (es genügt ein Unterbau aus nichtbrennbaren Baustoffen für Kamine in Gebäuden geringer Höhe, für Kamine die oberhalb der obersten Geschossdecke beginnen sowie für Kamine an Gebäuden),
- durchgehend sein; sie dürfen insbesondere nicht durch Decken unterbrochen sein, und
- für die Reinigung Öffnungen mit Kaminreinigungsverschlüssen haben.

Die Kamine müssen von Holzbalken einen Abstand von mindestens 2 cm, bei einschaliger Ausführung mindestens 5 cm haben. Bei sonstigen Bauteilen aus brennbaren Baustoffen beträgt der Mindestabstand 5 cm (außer bei Bauteilen mit geringer Fläche, wie z. B. Fußleisten oder Dachlatten). Zwischenräume in Decken- und Dachdurchführungen müssen mit nicht brennbaren Dämmstoffen ausgefüllt sein (z. B. Mineralwolle, Gasbeton). Verbindungsstücke zu Kaminen (z. B. das Rauchrohr eines Kaminofens im Wohnraum) müssen von Bauteilen aus brennbaren Baustoffen einen Abstand von mindestens 40 cm einhalten. Es genügt ein Abstand von mindestens 10 cm, wenn die Verbindungsstücke mindestens 2 cm dick mit nicht brennbaren Dämmstoffen ummantelt sind. Wenn diese Verbindungsstücke zu Kaminen durch Bauteile aus brennbaren Baustoffen führen (z. B. durch Holzdecken), sind sie in einem Schutzrohr aus nichtbrennbaren Baustoffen (z. B. Stahl) mit einem Abstand von mindestens 20 cm zu führen oder in einem Umkreis von mindestens 20 cm mit nicht brennbaren Dämmstoffen zu ummanteln. Das führt beispielsweise dazu, dass für ein Verbindungsstück mit 15 cm Durchmesser eine Aussparung von 55 cm benötigt wird. Ausnahmen von diesen Regeln (z. B. geringere Abstände) sind nur zulässig, wenn sichergestellt ist, dass kein brennbarer Baustoff sich auf über 85 °C aufheizen kann (bei Nennwärmeleistung der Feuerstätte).

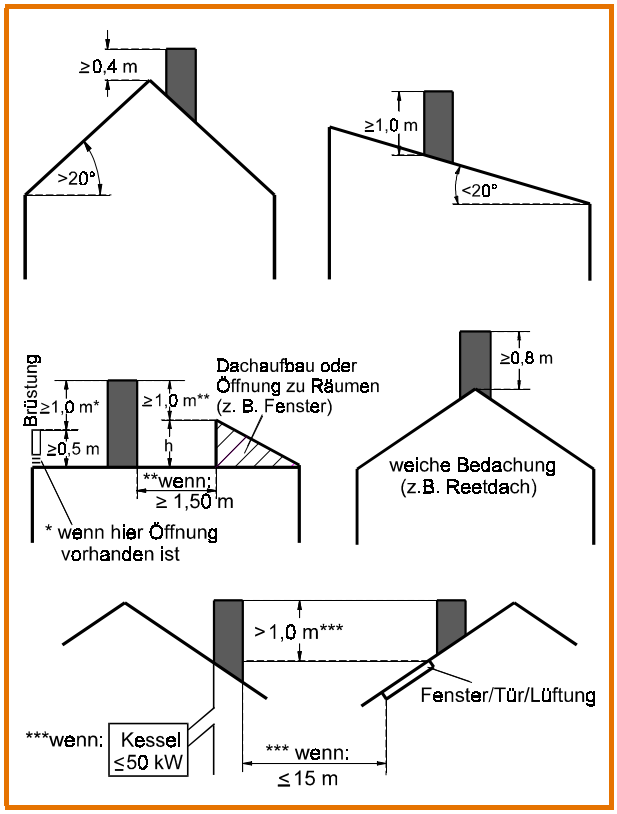


Abb. 8.3: Höhe und Abstände von Schornsteinmündungen (nach /8-7/, /8-11/). Unteres Bild: Anforderung gilt nur in Bayern

Für die Höhe der Mündungen von Kaminen gelten bestimmte Anforderungen, die auch in Abb. 8.3 zusammengefasst sind:

- Bei Dachneigungen bis einschließlich 20 Grad gilt eine Mindesthöhe von 1 m über der Dachfläche.
- Bei Dachneigungen von mehr als 20 Grad ist der First die Bezugsgröße, die Kaminmündung muss hier mindestens 40 cm höher sein.
- Bei Dachaufbauten, Öffnungen zu Räumen (z. B. Fenster) sowie ungeschützten Bauteilen aus brennbaren Baustoffen (ausgenommen Bedachungen) in einem Umkreis von 1,5 m müssen diese um mindestens 1 m überragt werden. Nach DIN 18 160 /8-7/ gilt diese Forderung auch im Umkreis von bis zur 3-fachen Höhe der Aufbauten (Empfehlung).
- Bei Feuerstätten für feste Brennstoffe in Gebäuden, die eine weiche Bedachung besitzen (z. B. Reeddächer) muss der Kamin im Bereich des Firstes angeordnet sein und diesen um mindestens 80 cm überragen.
- Speziell in Bayern gilt: Die Oberkanten von Lüftungsöffnungen, Fenstern oder Türen müssen um mindestens 1 m überragt werden, sofern sich diese in einem Umkreis von 15 m befinden (Abb. 8.3) und die Feststofffeuerung eine Gesamtnennwärmeleistung bis 50 kW besitzt. Der Umkreis vergrößert sich um 2 m je weitere angefangene 50 kW bis auf höchstens 40 m.

Bei der Errichtung von Schornsteinen und beim Anschluss der Feuerung sind auch die in Kapitel 6.3 dargestellten technischen Grundlagen zu beachten.

8.3 Kaminkehrung

Nach dem Schornsteinfegergesetz /8-16/ sind Grund- oder Wohnungseigentümer verpflichtet, dem Bezirksschornsteinfegermeister neu installierte Feuerungen zu melden und Zutritt zu den kehr- und überwachungspflichtigen Anlagen zu gewähren. Die Häufigkeit der Kehrung ist in der jeweiligen Kehrordnung der Länder geregelt (z. B. /8-12/); die Einheitlichkeit dieser Verordnungen in Deutschland regelt eine Musterverordnung. Eine Übersicht über die Kehrhäufigkeit von Holzfeuerungsanlagen bietet Tabelle 8.4.

Zusätzlich zur Kehrung werden die baurechtlich vorgeschriebenen Be- und Entlüftungseinrichtungen für den Aufstellraum der Feuerung (vgl. Kapitel 8.2.1) einmal jährlich überprüft. Außerdem kann es – je nach Ermessen des Kaminkehrers – erforderlich sein, dass die Kaminanlage ausgebrannt wird. Dies erfolgt dann, wenn sich die Verbrennungsrückstände (z. B. Glanzruß, Teerablagerungen) nicht mit den üblichen Kehrwerkzeugen entfernen lassen. Bei messpflichtigen Feuerungsanlagen wird außerdem eine einmalige oder eine jährlich wiederkehrende Emissionsmessung vom Bezirksschornsteinfegermeister durchgeführt (vgl. Kapitel 8.5.3).

Die für die Kehrung, Lüftungsprüfung, das Ausbrennen oder die Emissionsmessung anfallenden Gebühren richten sich nach der Gebührenordnung der Kaminkehrer /8-13/. Beispielsweise hängt die eigentliche Kehrgebühr von der Kaminhöhe und – bei vorhandenen Rauchrohren – auch von deren Länge, der Anzahl und dem Winkel der Richtungsänderungen sowie dem Rauchrohrdurchmesser ab.

8.4 Zulässige Brennstoffe und deren Einsatzbereich

Brennstoffgruppen. Biomasse-Festbrennstoffe werden auf Grund ihrer unterschiedlichen genehmigungsrechtlichen Beurteilung im Bundes-Immissionsschutzgesetz verschiedenen Gruppen (Ziffern 3 bis 8) zugeordnet (nach §3 (1) der 1. BImSchV /8-10/). Sie sind nachfolgend zusammengestellt:

Tabelle 8.4: Häufigkeit der Kehrung von Schornsteinen für Holzfeuerungen (nach /8-12/)

Häufigkeit	Anlagenart bzw. Einsatzfall
4-mal jährlich	- Kamine für Feuerungen, die ganzjährig regelmäßig benutzt werden (d. h. nahezu tägliche Benutzung außer z. B. in Urlaubs- und Abwesenheitszeiten bzw. bei gewerblicher Nutzung an den arbeitsfreien Wochenenden). Zu den ganzjährig benutzten Anlagen zählen in der Regel die Scheitholzkessel, jedoch nicht die jährlich überwachten mechanisch beschickten Anlagen (hier nur 2-malige Kehrung).
3-mal jährlich	- Kamine für feste und flüssige Brennstoffe, die nur in der üblichen Heizperiode (ca. 1. Oktober bis 30. Juni) benutzt werden (ohne Unterscheidung zwischen privater oder gewerblicher Nutzung)
2-mal jährlich	- Holzfeuerungen, die jährlich überwacht werden (z. B. Holzhackschnitzelfeuerungen >15 kW, vgl. Kapitel 8.5.3) - Kamine, die nur zeitweise benutzt werden, d. h. zum Beispiel als Zusatzheizung, die in den Übergangszeiten (Frühjahr/Herbst) auch regelmäßig im Einsatz ist (z. B. Einzelfeuerstätten) oder Anlagen in regelmäßig benutzten Wochenend- und Gartenhäusern[a]
1-mal jährlich	- Kamine, die nur selten benutzt werden (d. h. eine anderweitige Vollbeheizung wird vorausgesetzt, oder es handelt sich um Anlagen in Schlafräumen, Wochenend- oder Gartenhäusern, die nur in Ferienzeiten genutzt werden). Eine seltene Benutzung ist in der Regel auch bei offenen Kaminen gegeben. - Rauchrohre von Zentralheizungsanlagen (d. h. frei in Räumen zum Kamin hin verlaufende Verbindungsstücke), wobei Warmluftheizungen, die mehrere Räume beheizen, hierbei nicht als Zentralheizungen gelten

a. Bei weniger als 45 Betriebstagen pro Jahr wird nur einmal gemessen, bei mehr als 90 Betriebstagen dreimal.

- Ziffer 3: Torfbriketts, Brenntorf,
- Ziffer 3a: Grillholzkohle, Grillholzkohlebriketts,
- Ziffer 4: naturbelassenes stückiges Holz einschließlich anhaftender Rinde, beispielsweise in Form von Scheitholz, Hackschnitzel sowie Reisig oder Zapfen,
- Ziffer 5: naturbelassenes nicht stückiges Holz, beispielsweise in Form von Sägemehl, Spänen, Schleifstaub oder Rinde,
- Ziffer 5a: Presslinge aus naturbelassenem Holz in Form von Holzbriketts entsprechend DIN 51 731/8-5/ (Ausgabe Mai 1993) oder vergleichbare Holzpellets oder andere Presslinge aus naturbelassenem Holz mit gleichwertiger Qualität,
- Ziffer 6: gestrichenes, lackiertes oder beschichtetes Holz sowie daraus anfallende Reste, soweit keine Holzschutzmittel aufgetragen oder enthalten sind und Beschichtungen nicht aus halogenorganischen Verbindungen bestehen,
- Ziffer 7: Sperrholz, Spanplatten, Faserplatten oder sonst verleimtes Holz sowie daraus anfallende Reste, soweit keine Holzschutzmittel aufgetragen oder enthalten sind und Beschichtungen nicht aus halogenorganischen Verbindungen bestehen,
- Ziffer 8: Stroh oder ähnliche pflanzliche Stoffe.

Grundsätzlich können die genannten Brennstoffe auch in brikettierter oder pelletierter Form verwendet werden. Bei der Herstellung solcher Presslinge dürfen allerdings keine Bindemittel verwendet werden; als Ausnahmen sind lediglich Bindemittel aus Stärke, pflanzlichem Paraffin oder Melasse zugelassen (§3 (4) 1.BImSchV). Die unter Ziffer 5 genannten Holzpresslinge nach DIN 51 731 /8-5/ dürfen allerdings solche Bindemittel nicht enthalten. Allerdings werden in Deutschland zur Zeit überwiegend Holzpellets aus Österreich verkauft, bei deren Herstellung die nach ÖNORM M 7135 /8-15/ maximal zulässige Menge an Bindemitteln (Stärke) von 2 % zugesetzt werden darf.

Nicht näher definiert ist der Begriff „strohähnlich“ (Ziffer 8). Gemäß der Interpretation der zuständigen Behörden handelt es sich hierbei um Energiepflanzen wie z. B. Schilf, Elefantengras, Heu oder Maisspindeln /8-18/. Getreidekörner fallen demnach nicht unter die Brennstoffziffer 8, das Gleiche gilt auch für tierisches Einstreumaterial.

Einsetzbarkeit und Genehmigungspflicht. Für die Brennstoffe der Ziffern 3 bis 8 sind unterschiedliche Einsatzbereiche und Genehmigungsvorschriften zu beachten. Sie werden nachfolgend zusammengefasst.

Naturbelassene Holzbrennstoffe (Ziffer 4, 5 und 5a). Holzfeuerungen (für naturbelassene Holzbrennstoffe) mit weniger als 1 000 kW Nennwärmeleistung können ohne emissionsschutzrechtliche Genehmigung errichtet werden. Als naturbelassen gilt „Holz, das ausschließlich mechanischer Bearbeitung ausgesetzt war und bei seiner Verwendung nicht mehr als nur unerheblich mit Schadstoffen kontaminiert wurde“ (§2 1. BImSchV /8-10/). Neben den forstlichen Ernterückständen oder den Nebenprodukten der Sägeindustrie können naturbelassene Holzbrennstoffe auch aus Gebrauchtholz (Alt- oder Recyclingholz) stammen; für den Einsatz in nicht genehmigungspflichtigen Kleinanlagen kann hier allerdings der Nachweis der Unbedenklichkeit gefordert werden.

Nicht-naturbelassene Holzbrennstoffe (Ziffer 6 und 7). Zu den nicht-naturbelassenen Brennstoffen mit Einsatzmöglichkeit im Kleinanlagenbereich (unter 1 000 kW) zählen Schreinereiabfälle und Reste aus der Verarbeitung von Holzwerkstoffen, die aber nicht mit halogenorganischen Verbindungen verunreinigt sein dürfen. Ihr Einsatz ist nach § 6 der 1.BImSchV /8-10/ nur zulässig in Anlagen ab 50 kW Nennwärmeleistung, und es muss sich dabei – sofern die Leistung unter 1 000 kW liegt – um Anlagen der holzbe- und -verarbeitenden Betriebe handeln (vgl. auch Tabelle 8.6).

Stroh (Ziffer 8). Bei Stroh oder strohähnlichen Brennstoffen der Ziffer 8 (z. B. Heu, Miscanthus) setzt die Genehmigungspflicht gemäß 4. BImSchV (Sp. 2 Abs. 1.3) bereits bei 100 kW Feuerungswärmeleistung ein (vgl. auch Tabelle 8.5). Bis 1 000 kW wird hierfür noch das sogenannte „vereinfachte" Verfahren angewendet, das heißt, dass bei Planung und Errichtung der Anlage auf eine öffentliche Auslegung zur Bürgerbeteiligung gemäß BImSchG § 10 verzichtet werden kann. In der Praxis stellt jedoch auch dieses vereinfachte Verfahren eine – verglichen mit Holzfeuerungen, die noch bis 1 000 kW genehmigungsfrei sind – relativ große Hürde dar. Sie führt dazu, dass Strohfeuerungen zwischen 100 und ca. 1 000 kW Leistung in Deutschland nahezu nicht vorkommen.

Körner (Getreide, Raps, etc.). Die Zulässigkeit von Körnern in nicht-genehmigungspflichtigen Feuerungen ist nicht eindeutig geklärt. Zwar können sie im Gemisch mit Stroh (z. B. als Getreide-Ganzpflanzen) eingesetzt werden, da es sich hierbei um einen „strohähnlichen" Brennstoff nach Ziffer 8 handelt. Bei alleiniger Verwendung von Körnern werden diese jedoch von den Genehmigungsbehörden meist nicht als strohähnlich angesehen.

Bei derartigen Brennstoffen besteht aber die Möglichkeit einer Ausnahmegenehmigung durch die zuständige Behörde (d. h. durch das Landratsamt bzw. die Kreisverwaltungsbehörde). Eine solche Ausnahme wird auf Basis von §20 der 1.BImSchV zugelassen, wenn die genannten Brennstoffbeschränkungen „im Einzelfall wegen besonderer Umstände durch einen unangemessenen Aufwand oder in sonstiger Weise zu einer unbilligen Härte führen und schädliche Umwelteinwirkungen nicht zu befürchten sind" /8-10/.

Neben den rechtlichen Bedenken ist der Einsatz von Körnern in Kleinanlagen auch mit erheblichen technischen Risiken verbunden, die meist auf den höheren Aschegehalt und die niedrigen Ascheerweichungstemperaturen zurückzuführen sind (vgl. Kapitel 6.2.1.4).

Mist aus der Tierhaltung. Hierbei handelt es sich z. B. um Pferdemist, der auf Basis von Sägemehl oder Stroh anfällt und gelegentlich bei der Entsorgung Probleme bereitet. Für derartiges Material gilt die gleiche Einschätzung wie für die oben genannten Körner. Auch hier ist ein legaler Einsatz als Brennstoff nur über die erwähnte Ausnahmegenehmigung nach §20 der 1.BImSchV möglich.

Altholz. Für das aus dem Recycling stammende Altholz (auch „Gebrauchtholz") gelten zum Teil spezielle Regelungen. Nach dem Entwurf der neuen Altholzverordnung wird es vier Altholzklassen zugeordnet /8-3/:

- Kategorie A I: nicht behandeltes Altholz (entspricht Ziffer 4 und 5 der 1. BImSchV)
- Kategorie A II: behandeltes Altholz, d. h. verleimtes, beschichtetes, lackiertes oder anderweitig behandeltes Altholz ohne halogenorganische Verbindungen in der Beschichtung und ohne Holzschutzmittel (entspricht Ziffer 6 und 7 der 1. BImSchV),
- Kategorie A III: belastetes Altholz, d. h. Altholz mit halogenorganischen Verbindungen in der Beschichtung ohne Holzschutzmittel,
- Kategorie A IV: besonders belastetes Altholz, d. h. mit Holzschutzmitteln behandeltes Altholz, wie Bahnschwellen, Leitungsmasten, Hopfenstangen, Rebpfähle sowie sonstiges Altholz, das auf Grund seiner Schadstoffbelastung nicht den Altholzkategorien A I, A II oder A III zugeordnet werden kann, ausgenommen PCB-Altholz).

Unbelastetes Altholz der Kategorie A I kann – da es mit den oben genannten Brennstoffen der Ziffern 4 und 5 der 1. BImSchV vergleichbar ist – auch in Kleinanlagen ohne Leistungsbegrenzung eingesetzt werden. Der Nutzer solchen Holzes muss dessen Unbedenklichkeit sicherstellen; das geschieht durch Sichtkontrolle, Geruchsprüfung und Sortierung. Bei den Gebrauchthölzern der Kategorie A I handelt es sich in der Regel um Europaletten, Einwegpaletten, Industriepaletten aus Vollholz sowie aus Vollholz hergestellte Transportkisten, Verschläge, Obstkisten, Kabeltrommeln, Möbel und Kücheneinrichtungen. Hölzer der Kategorie A II können ebenfalls in Kleinanlagen eingesetzt werden, sofern es sich hierbei Anlagen der Holzbe- oder -verarbeitung handelt. Alle übrigen Althölzer sind nur in genehmigungspflichtigen Anlagen über 100 kW Feuerungswärmeleistung erlaubt.

§ 8

8.5 Anforderungen, Emissionsbegrenzungen und -überwachung

8.5.1 Anforderungen an den Anlagenbetrieb

Aus den Verordnungen zum Immissionsschutz und den dazugehörigen Erläuterungstexten lassen sich bestimmte generelle Anforderungen an die Anlagenausstattung und den Betrieb von Holzfeuerungen ableiten. Sie sind nachfolgend zusammengefasst.

Brennstofffeuchte. Die in handbeschickten Biomassefeuerungen eingesetzten Brennstoffe müssen in lufttrockenem Zustand sein (§3 (3) 1. BImSchV /8-10/). Als Faustregel kann davon ausgegangen werden, dass ein lufttrockener Zustand nach folgenden Lagerzeiten erreicht ist (nach /8-18/):

- Pappel, Fichte: 1 Jahr
- Linde, Erle, Birke: 1,5 Jahre
- Buche, Esche, Obstbäume: 2 Jahre
- Eiche: 2,5 Jahre

Brennstoffbeschränkungen für Kleinstanlagen (bis 15 kW). In Holzfeuerungen bis 15 kW Nennwärmeleistung dürfen nach §5 der 1. BImSchV /8-10/ nur naturbelassene stückige Holzbrennstoffe der Brennstoffziffern 4 und 5a verwendet werden, d. h. Scheitholz, Hackschnitzel, Reisig, Zapfen oder Holzpellets und -briketts. Andere naturbelassene Holzbrennstoffe wie Sägemehl, Späne, Schleifstaub oder Rinde scheiden somit aus. Das Gleiche gilt auch für Stroh- oder sonstige Pellets, da diese nicht – wie gefordert – der DIN 51 731 /8-5/ entsprechen; ebenfalls ausgeschlossen sind Getreide- oder Rapskörner. Bei Kochheizherden oder Kachelöfen ohne Heizeinsatz (Grundöfen) gelten die genannten Brennstoffbeschränkungen auch, wenn die 15 kW-Grenze überschritten wird (vgl. §6 (4), 1. BImSchV /8-10/). Neben den Holzbrennstoffen sind prinzipiell auch Braun- und Steinkohlebrennstoffe erlaubt, sofern diese nach Angabe des Herstellers geeignet sind.

Dauereinsatz. Offene Kamine dürfen nicht zum regelmäßigen Heizen sondern nur gelegentlich betrieben werden (§4 (3) 1. BImSchV /8-10/). In ihnen ist auch die Nutzung von Braun- oder Steinkohlebriketts untersagt. Das gilt jedoch nicht für Kamine, die mit geschlossenem Feuerraum betrieben werden, wenn deren Wärmeabgabe bestimmungsgemäß überwiegend durch Konvektion erfolgt.

Vollastbetrieb und Wärmespeicheranforderung. Handbeschickte Biomasse-Feuerungsanlagen mit flüssigem Wärmeträgermedium (Zentralheizungsanlagen) sind grundsätzlich bei Volllast zu betreiben. Hierzu ist ein ausreichend bemessener Wärmespeicher (Pufferspeicher) einzusetzen. Diese Forderung gilt nicht, wenn es sich um eine Anlage handelt, die die in Kapitel 8.5.2 dargestellten Emissionsanforderungen auch im Teillastbetrieb, d. h. bei gedrosselter Verbrennungsluftzufuhr, erfüllt (§6 (3), 1. BImSchV /8-10/). In der Praxis ist jedoch davon auszugehen, dass auf einen Pufferspeicher aus technischen Gründen und wegen des gestiegenen Betriebskomforts nicht verzichtet werden kann.

Wärmespeicherdimensionierung. Über die Dimensionierung der Wärmespeicher für nicht-teillastfähige Zentralheizungskessel werden in der 1. BImSchV keine definitiven Vorschriften gemacht. Lediglich in der für das Kaminkehrerhandwerk kommentierten Fassung der Verordnung werden mindestens 25 l Speichervolumen je Kilowatt Nennwärmeleistung gefordert /8-18/. In der Praxis wird diese Minimalanforderung oft als nicht ausreichend – auch nicht für teillastfähige Anlagen – angesehen; beispielsweise wird für die Beantragung von öffentlichen Fördermitteln für Scheitholzkessel ein Mindestvolumen von 50 l/kW gefordert /8-2/; die meisten Praxisempfehlungen liegen sogar bei 100 l/kW, d. h., dass eine Scheitholzfeuerung mit 25 kW Nennwärmeleistung über ein Speichervolumen von 2 500 l verfügen sollte.

8.5.2 Emissionsbegrenzungen

Die Schadstoffemissionen von Feuerungen für feste Biomassebrennstoffe sind im Bundes-Immissionsschutzgesetz durch die Bundes-Immissionsschutzverordnung (1. BImSchV.) und – bei größeren Anlagenleistungen – durch die Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) begrenzt /8-10/. Die darin festgelegten Maximalwerte sind in Tabelle 8.5 zusammengestellt.

Für Anlagen bis 15 kW Nennwärmeleistung wurden keine Emissionsbegrenzungen festgelegt, somit besteht hier auch keine Messpflicht (vgl. Kapitel 8.5.3). Hier gelten lediglich die allgemeinen Anforderungen der 1. BImSchV (§ 4), wonach die Abgasfahne von Anlagen für feste Brennstoffe im Dauerbetrieb grundsätzlich einen helleren als den Grauwert 1 der sogenannten „Ringelmann-Skala“ (vgl. hierzu 1. BImSchV, Anlage 1) erreichen muss.

Tabelle 8.5: Emissionsgrenzwerte bei der Verfeuerung von naturbelassenen biogenen Festbrennstoffen (nach /8-10/ bzw. /8-4/); Emissionswerte bezogen auf Abgas im Normzustand (Nm³) bei 0 °C und 1013 mbar

Anlagenleistung	N/F[a]	relevante Vorschrift	Bezugs-sauerstoff Vol. % O_2	Emissionsbegrenzung			
				CO (g/Nm³)	Ges.-C[b] (mg/Nm³)	NO_x[c] (mg/Nm³)	Staub (mg/Nm³)
Emissionswerte bei der Verfeuerung von naturbelassenem Holz:							
bis 15 kW	N	1. BImSchV		keine Begrenzung (außer „heller als Grauwert 1“)[d]			
15 – < 50 kW	N	1. BImSchV	13	4	-	-	150
50 – < 150 kW	N	1. BImSchV	13	2	-	-	150
150 – < 500 kW	N	1. BImSchV	13	1	-	-	150
500 – < 1000 kW	N	1. BImSchV	13	0,5	-	-	150
1 – < 2,5 MW	F	TA Luft[f]	11	0,15[e]	10	250[c]	100
2,5 – < 5 MW	F	TA Luft[f]	11	0,15	10	250[c]	50
5 – < 50 MW	F	TA Luft[f]	11	0,15	10	250[c]	20
Emissionswerte bei der Verfeuerung von Stroh und ähnlichen pflanzlichen Stoffen[g]:							
15 – < 100 kW	N	1. BImSchV	13	4	-	-	150
100 kW – < 1 MW[g]	F	TA Luft[f]	11	0,25	50	500	50
1 – < 50 MW[g]	F	TA Luft[f]	11	0,25[e]	50	400	20

a. Mit Anlagenleistung ist hier gemeint: N Nennwärmeleistung, d. h. die höchste von der Feuerungsanlage im Dauerbetrieb nutzbar abgegebene Wärmemenge je Zeiteinheit (wird vom Hersteller unter Angabe des Brennstoffs festgelegt)
F Feuerungswärmeleistung, d. h. der auf den unteren Heizwert bezogene Wärmeinhalt des Brennstoffs, der einer Feuerungsanlage im Dauerbetrieb je Zeiteinheit zugeführt werden kann.
b. Die Emission flüchtiger organischer Kohlenstoffverbindungen (engl. VOC) wird als „Gesamtkohlenstoff“ (Ges.-C) angegeben.
c. angegeben als Stickstoffdioxid (NO_2)
d. allgemeine Anforderung der 1. BImSchV: Abgasfahne muss heller sein als „Grauwert 1“ (Grauwertskala in Anlage 1 zur 1. BImSchV)
e. Bis 2,5 MW Feuerungswärmeleistung gilt der Grenzwert nur bei Betrieb mit Nennlast.
f. TA-Luft, novellierte Fassung, Inkrafttreten: 1. Okt. 2002 /8-4/
g. Bei Feuerungen für Stroh und ähnliche Brennstoffe sind ab 100 kW Feuerungswärmeleistung außerdem für PCDD/F (Dioxine und Furane) eine Begrenzung von 0,1 ng TE/Nm^3 und für gasförmige anorganische Chlorverbindungen (angegeben als HCl) von 30 mg/Nm^3 einzuhalten /8-4/.

§ 8

Zwischen 15 und 1 000 kW Nennwärmeleistung gelten für Holzfeuerungen lediglich Kohlenmonoxid(CO)- und Staubgrenzwerte, die je nach Anlagenleistung abgestuft festgelegt wurden (Tabelle 8.5). Abweichend davon wurden für „Stroh und ähnliche pflanzliche Stoffe“ (Brennstoffziffer 8) besondere rechtliche Anforderungen festgelegt. Bis 100 kW Nennwärmeleistung gelten zwar einheitlich die gleichen Grenzwerte wie bei Holzfeuerungen bis 50 kW; ab 100 kW Leistung (hier: Feuerungswärmeleistung, vgl. Tabelle 8.5) erhöhen sich jedoch die Anforderungen, da die Anlagen in den Gültigkeitsbereich der TA Luft fallen. Neben den deutlich strengeren Emissionsbegrenzungen (Tabelle 8.5) ändert sich damit auch der Sauerstoff-Bezugswert von 13 auf 11 % O_2; dazwischen liegt der Faktor 1,25, d. h. dass beispielsweise ein Staubgrenzwert von 150 mg/Nm^3 bei 11 % O_2 einer Konzentration im Abgas von 120 mg/Nm^3 bei 13 % O_2 entspricht. Zusätzlich müssen genehmigungspflichtige Strohfeuerungen (über 100 kW) auch Begrenzungen bei den organischen Kohlenstoffverbindungen sowie bei den Stickstoffoxiden (NO_x) einhalten.

Tabelle 8.6: Emissionsgrenzwerte bei der Verfeuerung von gestrichenem, lackiertem oder beschichtetem Holz (Ziffer 6) und Sperrholz, Spanplatten, Faserplatten oder verleimtem Holz (Ziffer 7) in Anlagen der holzbe- und -verarbeitenden Betriebe; Emissionsangaben bezogen auf Abgas im Normzustand (Nm³) bei 13 % O_2 (nach /8-10/)

Anlagen-Nennwärmeleistung (kW)	Emissionsbegrenzung			
	CO (g/Nm³)	Ges.-C (mg/Nm³)	NO_x (mg/Nm³)	Staub (mg/Nm³)
< 50	Brennstoffe nicht zugelassen			
50 - 100	0,8	-	-	150
>100 - 500	0,5	-	-	150
>500 - 1 000	0,3	-	-	150

Für die Verbrennung von gestrichenem, lackiertem oder beschichtetem Holz (Ziffer 6) und Sperrholz, Spanplatten, Faserplatten oder verleimtem Holz (Ziffer 7), die nur in Anlagen der holzbe- und -verarbeitenden Betriebe und auch nur ab einer Nennwärmeleistung von 50 kW zulässig sind, gelten strengere Grenzwerte für Kohlenmonoxid (Tabelle 8.6). Die Einhaltung der Emissionsgrenzwerte wird hier jährlich vom Bezirkskaminkehrermeister festgestellt, unabhängig davon, ob es sich um eine hand- oder automatisch beschickte Feuerung handelt.

8.5.3 Emissionsüberwachung

Alle Biomasse-Feststofffeuerungen in Zentralheizungsanlagen über 15 kW Nennwärmeleistung unterliegen einer Messpflicht, lediglich Einzelfeuerstätten für die Beheizung eines Einzelraumes oder für die ausschließliche Brauchwasserbereitung sind davon befreit (§14, 1. BImSchV). Die anfallenden Kosten für die Überwachungsmessungen müssen vom Anlagenbetreiber übernommen werden. An hand- und automatisch beschickte Feuerungen werden zum Teil unterschiedliche Überwachungsanforderungen gestellt.

Handbeschickte Scheitholzfeuerungen. Bei handbeschickten Scheitholzfeuerungen für naturbelassene stückige Brennstoffe (Brennstoffziffer 4) wird die Einhaltung der in Tabelle 8.5 genannten Grenzwerte nur einmalig und zwar innerhalb von 4 Wochen nach der Inbetriebnahme vom Bezirkskaminkehrermeister festgestellt. Wenn die Emissionsanforderungen nicht eingehalten werden, erfolgt innerhalb von 6 Wochen eine Wiederholungsmessung. Von dieser Messverpflichtung sind alle Holz-Zentralheizungsanlagen mit mehr als 15 kW Nennwärmeleistung betroffen. Da für Anlagen bis 15 kW Nennwärmeleistung keine Emissionsbegrenzungen festgelegt wurden, besteht bei ihnen auch keine Messpflicht.

Bei handbeschickten Anlagen, die in holzbe- und -verarbeitenden Betrieben ab 50 kW Nennwärmeleistung auch für gestrichene, lackierte oder beschichtete Hölzer (Brennstoffziffer 6) oder für Sperrholz, Spanplatten, Faserplatten oder verleimtes Holz (Brennstoffziffer 7) zulässig sind, besteht – wie bei den mechanisch beschickten Anlagen – eine jährlich wiederkehrende Messpflicht. Das gilt auch, wenn es sich nicht um eine Zentralheizungsanlage sondern um eine Warmluftheizung eines gewerblichen Holzverarbeiters (z. B. Schreinerei) handelt.

In beiden Fällen sind die Messungen stets im ungestörten Dauerbetriebszustand der Feuerungsanlage bei Nennwärmeleistung oder ersatzweise bei der höchsten einstellbaren Wärmeleistung durchzuführen (1. BImSchV, Anlage III). Handelt es sich allerdings um eine teillastfähige Anlage, die ohne ausreichend dimensioniertem Wärmespeicher betrieben wird, so ist die Messung im Teillastbereich durchzuführen. Bei den übrigen Anlagen wird versucht, niedrige Lastzustände während der Messung zu vermeiden, da sich der Schadstoffausstoß – zumindest beim Kohlenmonoxid – in der Regel erhöht.

Die allgemeine Anforderung der 1. BImSchV (§ 4), wonach die Abgasfahne von Anlagen für feste Brennstoffe im Dauerbetrieb grundsätzlich einen helleren als den Grauwert 1 der sogenannten „Ringelmann-Skala“ erreichen muss (vgl. hierzu 1. BImSchV, Anlage 1), wird nicht regelmäßig überprüft. Hierbei handelt es sich um einen eher selten verwendeten Messparameter, der hauptsächlich im Streitfall, wie zum Beispiel bei Belästigungen in der Nachbarschaft, zur Anwendung kommt. Die mit einem hohen Grauwert gemessene Rußbildung weist auf einen besonders unvollständigen Verbrennungsprozess mit entsprechender hohen Geruchsbelästigungen hin. Messungen des Grauwertes können auch bei nicht messpflichtigen Anlagen bis 15 kW Nennwärmeleistung vorgenommen werden.

Mechanisch beschickte Anlagen. Bei mechanisch (automatisch) beschickten Holz-Zentralheizungsanlagen von mehr als 15 kW Nennwärmeleistung muss die Einhaltung der Emissionsgrenzwerte (Tabelle 8.5) im Betrieb jährlich wiederkehrend nachgewiesen werden (§15, 1. BImSchV). Kleinere Anlagen bis einschließlich 15 kW – darunter fallen viele Pelletkessel und neuerdings auch einige Holzhackschnitzelfeuerungen – sind dagegen von der wiederkehrenden Überwachung befreit; das gilt auch für die Erstmessungen nach der Inbetriebnahme, da für diese Leistungsklasse keine Emissionsbegrenzungen festgelegt wurden.

Bei Anlagen mit einer Nennwärmeleistung von weniger als 1 000 kW werden die Überwachungsmessungen vom Bezirkskaminkehrermeister durchgeführt. Bei automatisch beschickten Feuerungsanlagen für „Stroh und ähnliche Brennstoffe“ (Brennstoffziffer 8) gilt dies jedoch nur bis <100 kW. Strohfeuerungen höherer Anlagenleistung werden außerdem nur noch alle 3 Jahre überprüft (nach der vorgeschriebenen Erstmessung, vgl. BImSchG §28 /8-10/). Da diese Messung aber nicht vom Kaminkehrer, sondern von einem speziellen hierfür zugelassenen Prüfinstitut durchgeführt wird, sind die anfallenden Kosten um

ein Vielfaches höher, zumal dabei auch eine Vielzahl weiterer Messgrößen erfasst wird.

Ausnahmen von der jährlichen Messpflicht bestehen – wie bei den Scheitholzfeuerungen – wenn die Feuerung jährlich bis zu höchstens 300 Stunden und ausschließlich zur Trocknung von selbstgewonnenen Erzeugnissen in landwirtschaftlichen Betrieben eingesetzt wird, wobei die Trocknung über Wärmeaustauscher erfolgen muss. Im letzteren Fall wird nur in jedem dritten Jahr durch den Bezirksschornsteinfegermeister gemessen (§15 (2), 1. BImSchV).

Der zuständige Kaminkehrer kündigt die Messung, d. h. den voraussichtlichen Messtermin, zwischen 8 bis 6 Wochen vorher schriftlich an. Die Messung findet im ungestörten Dauerbetriebszustand bei Nennwärmeleistung oder ersatzweise bei der höchsten einstellbaren Wärmeleistung statt. Eine Messung während einer Betriebsphase mit zu geringer Leistungsabnahme (z. B. im Sommer) wird in der Regel vermieden, da die Messergebnisse unter solchen Betriebsbedingungen erfahrungsgemäß schlechter ausfallen.

§ 8

Kosten der Festbrennstoffnutzung

9.1 Brennstoffpreise und -kosten

Die meisten in Kleinanlagen einsetzbaren Biomassebrennstoffe werden bereits zu kalkulierbaren Marktpreisen angeboten, so dass die Kosten für deren Beschaffung durch Anfrage bei den jeweiligen Anbietern festgestellt werden können. Eine solche Marktanalyse wurde erstmals in 1997 durchgeführt /3-15/ und für den vorliegenden Leitfaden nach dem gleichen Schema neu erhoben. Die erhobenen Preise sind auszugsweise in Tabelle 9.1 zusammengestellt. Sie enthalten die jeweilige Mehrwertsteuer, die je nach

Tabelle 9.1: Übersicht über Preise von trockenen Holzbrennstoffen für Kleinverbraucher in Deutschland (inkl. Anlieferung und MwSt, Stand: Nov. 2001). Zum Vergleich: Ein Heizölpreis von 0,35 €/l entspricht 3,5 ct/kWh.

Brennstoff	Verkaufseinheit	Preise je Verkaufseinheit (€)			Preise je Energieeinheit					
					in €/GJ[a]			in ct/kWh[a]		
		Mittelwert	min	max	Mittelwert	min	max	Mittelwert	min	max
Scheitholz[b]:										
Meterware Hartholz, nicht gespalten	Rm	41,4	35,4	50,8	5,7	4,9	7,0	2,1	1,8	2,5
Meterware Hartholz, gespalten	Rm	51,3	37,2	69,8	7,1	5,2	9,7	2,6	1,9	3,5
Meterware Weichholz, nicht gespalten	Rm	31,0	24,8	45,3	6,0	4,8	8,8	2,2	1,7	3,2
Meterware Weichholz, gespalten	Rm	33,4	25,4	51,6	6,5	4,9	10,0	2,3	1,8	3,6
33 cm Hartholz, nicht gespalten	Rm	49,7	44,4	55,0	6,9	6,1	7,6	2,5	2,2	2,7
33 cm Hartholz, gespalten	Rm	61,1	46,0	81,7	8,5	6,4	11,3	3,0	2,3	4,1
33 cm Weichholz, nicht gespalten	Rm	40,1	36,4	44,4	7,8	7,0	8,6	2,8	2,5	3,1
33 cm Weichholz, gespalten	Rm	43,0	27,8	58,6	8,3	5,4	11,3	3,0	1,9	4,1
25 cm Hartholz, nicht gespalten	Rm	51,7	46,5	54,4	7,2	6,4	7,5	2,6	2,3	2,7
25 cm Hartholz, gespalten	Rm	61,1	46,8	80,3	8,5	6,5	11,1	3,0	2,3	4,0
25 cm Weichholz, nicht gespalten	Rm	42,9	41,5	44,2	8,3	8,0	8,5	3,0	2,9	3,1
25 cm Weichholz, gespalten	Rm	45,4	34,3	58,6	8,8	6,6	11,3	3,2	2,4	4,1
Pellets[c]:										
in 15 kg Säcken auf Paletten	t	228,7	204,5	264,8	13,8	12,3	16,0	5,0	4,4	5,7
in „Big Bags“ mit je 800 bis 1150 kg	t	193,2	179,0	200,3	11,6	10,8	12,1	4,2	3,9	4,3
lose Anlieferung 3 t	t	185,7	172,5	203,5	11,2	10,4	12,3	4,0	3,7	4,4
lose Anlieferung 6 t	t	181,7	163,6	198,4	11,0	9,9	12,0	3,9	3,6	4,3
lose Anlieferung 12 t	t	175,9	153,4	198,4	10,6	9,2	12,0	3,8	3,3	4,3
Briketts:										
Holzbriketts < 1 t Lieferung	t	267,0	202,5	317,0	16,1	12,2	19,1	5,8	4,4	6,9
Holzbriketts > 1 t Lieferung	t	215,9	181,5	265,9	13,0	10,9	16,0	4,7	3,9	5,8
Rindenbriketts < 1 t Lieferung	t	363,0	357,9	368,1	21,0	21,6	22,2	7,6	7,8	8,0
Rindenbriketts > 1 t Lieferung	t	305,8	294,5	317,0	18,4	17,8	19,1	6,6	6,4	6,9
Großkunde für Selbstaufbereiter[d]:	Rm	13,6	9,9	20,5	2,6	1,9	4,0	0,9	0,7	1,4

a. Berechnungsgrundlage: Wassergehalt w_{Roh} = 15 % (außer Pellets: w = 10 %), Heizwert $H_{u\,(wf)}$ für Buche/Fichte/Pellets = 18,7 MJ/kg, 1 Rm Hartholz = 465 kg (bei w_{Roh}), 1 Rm Weichholz = 333 kg (bei w_{Roh}) (vgl. hierzu auch Kapitel 4.4).
b. Definitionsgemäß weist Hartholz eine Rohdichte von mehr als 0,55 g/cm³ auf, Weichholz liegt darunter (vgl. Kapitel 4.3).
c. bei loser Anlieferung inkl. Einblaspauschale
d. Schwarten und Spreißel gebündelt à 2 bis 4 Rm (vom Sägewerk)

Anbieter verschieden sein kann. In der Regel beträgt sie bei Direktbezug von forstlichen Anbietern (Forstbetriebe, Forstämter) 5 % und im sonstigen Handel forstlicher Produke 7 %. Holzpellets werden als forstliches Produkt folglich auch mit 7 % Mehrwertsteuer verkauft. Die Steuer muss auf Verlangen in der Rechnung ausgewiesen werden.

Eine Übersicht zu den Anbietern und Beschaffungsmöglichkeiten wird in Kapitel 3.1 (vgl. Tabelle 3.1) gegeben. Die für eine Mengen- und Preisbeurteilung notwendigen Umrechnungszahlen finden sich in Kapitel 4.4.

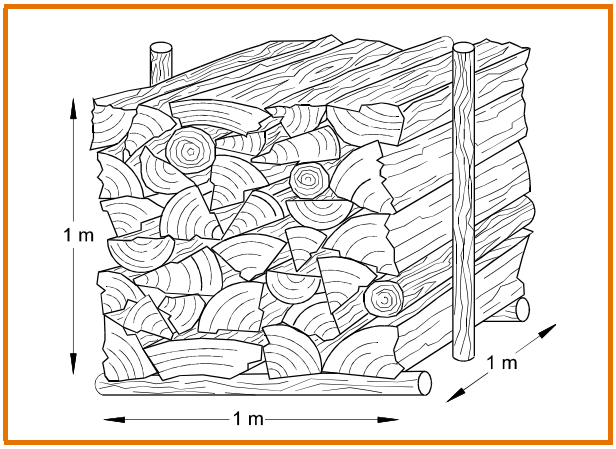


Abb. 9.1: Ein Raummeter Brennholz

Marktpreise für Scheitholz. Die häufigste Einheit für den Scheitholzverkauf ist der Raummeter. In dieser Einheit kann die reine Holzmasse weitgehend unabhängig vom Wassergehalt gehandelt werden. Beim Raummeter handelt es sich um geschichtetes Holz, das ab einem bestimmten Durchmesser gespalten ist. Da es beim Anbieter zunächst meist als Meterscheit über einen längeren Zeitraum zwischengelagert wird, ist mit der Verkaufseinheit des Raummeters gemeinhin diese Ausgangsform des „Meterscheit-Raummeters" definiert (Abb. 9.1), auch wenn später das weiter aufbreitete ofenfertige Holz (z. B. 33-er Scheitlänge) im geschichteten Zustand ein etwas geringeres Volumen einnehmen kann. Gelegentlich kann der Raummeter beim Anbieter aber auch individuell anders definiert sein, oder es werden kurz gesägte Scheite nach Schütt-Kubikmetern verkauft. Auch der Verkauf nach Gewicht ist möglich, er ist aber mit Unsicherheiten bezüglich des Wassergehaltes verbunden. Der Verkauf als Schüttgut (lose oder nach Gewicht) nimmt in jüngster Zeit zu, da bei der Aufbereitung vermehrt hochmechanisierte automatische Brennholzmaschinen (ohne Zwischenaufbereitungsschritte) eingesetzt werden (Kapitel 3.3.2). Planungszahlen für die Umrechnung der Verkaufseinheiten sind in Kapitel 4.4 zusammengestellt.

Die Preisbildung für Scheitholzbrennstoffe hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab. Hierzu zählen vor allem die absetzbare Brennstoffmenge, Nähe zum Verbraucher oder zu den Ballungsgebieten, Aufbereitungsqualität, Lagerdauer, Serviceangebote und Vieles mehr /3-15/.

Die Größenordnung der üblichen Schwankungen lässt sich am Beispiel der Preisvariabilität für stückige Brennstoffe in Abb. 9.2 ablesen. Mit Zunahme der Aufbereitungsintensität ist ein deutlicher Preisanstieg zu verzeichnen. Er verläuft bei Hartholz und Weichholz etwa gleich. Bei den Preisen je Raummeter erscheint Weichholz zunächst deutlich günstiger (Abb. 9.2, unten links). Der Vergleich der heizwertbezogenen Preise (Abb. 9.2, unten rechts) zeigt jedoch, dass für die gleiche Energiemenge bei gleicher Brennstoffform ein nahezu einheitlicher Verkaufspreis zustande kommt. Die größte Preisspanne lässt sich für die besonders häufig verkauften Hartholzscheite mit 33 cm Länge feststellen. Hier liegt der Durchschnittspreis einschließlich Anlieferung bei 61 €/Rm; er kann aber in Ausnahmefällen (städtische Abnehmer) bis zu 82 €/Rm betragen. Für dieses Holz besteht ein breiter Markt, der sich auch bis in die Ballungszentren erstreckt. Die Nähe zu den Großstädten wirkt sich generell preiserhöhend aus /3-15/.

Das gilt auch für Selbstwerberholz, welches in waldreichen Gebieten ab Wald zum Teil auch kostenlos angeboten wird, jedoch in Stadtnähe Preise bis 30 €/Rm (unaufgearbeitet!) erzielen kann. Generell ist solches Holz jedoch immer am günstigsten (Abb. 9.2, oben), handelt es sich doch um einen Rohstoff bzw. um einen nur wenig aufbereiteten Brennstoff, für den die eigentliche Arbeits-, Transport- und Einlagerungsleistung durch den Käufer erst noch erbracht werden muss. Die dargestellten Preise spiegeln hierbei auch den bereits geleisteten Aufwand wieder. Nach dem reinen Selbstwerberholz, das zum Teil erst noch gefällt werden muss (z. B. bei der Durchforstung) stellen die sogenannten „fallenden Längen" die zweitniedrigste Aufarbeitungsstufe dar. Hierbei handelt es sich um entastetes Holz, das aber noch nicht auf sogenannte „Fixlängen" von vier, sechs oder acht Metern abgelängt wurde. Der Verkauf von fallenden Längen an Brennholzaufbereiter ist in der Praxis nur bei Hartholz üblich.

Wenn jedoch ofenfertiges Holz gekauft wird, gelten die in Abb. 9.2 (unten) genannten Endverbraucherpreise. Darin sind die Zuschläge für die Anlieferung frei Haus bereits enthalten. Diese Zuschläge

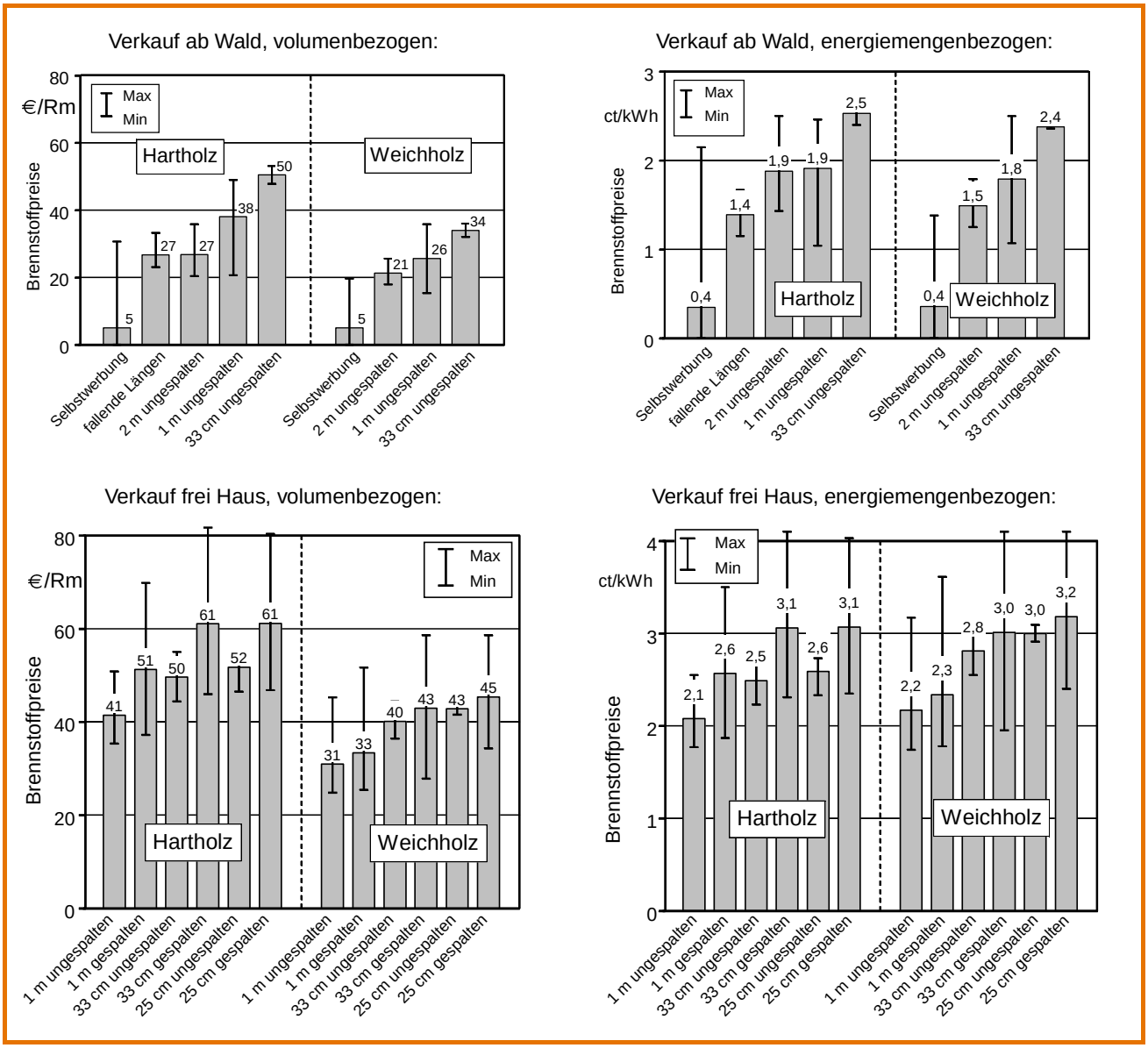


Abb. 9.2: Volumen- und energiemengenbezogene Preise von Scheitholz bei Verkauf ab Wald bzw. Lieferung frei Haus (inkl. MwSt, Stand: Nov. 2001). Zum Vergleich: Heizöl bei 0,35 €/l entspricht 3,5 ct/kWh

lassen sich bei Scheitholz auf durchschnittlich ca. 4 bis 5 €/Rm beziffern, das heißt, dass Selbstabholern meist ein entsprechender Preisnachlass für das ofenfertige Holz eingeräumt wird.

Marktpreise von Holzpellets und Briketts. „Veredelte" Holzbrennstoffe wie Holzpellets und -briketts, die vor allem von Kleinverbrauchern abgenommen werden, sind meist deutlich teuer als Scheitholz. Das wird anhand der Preisübersicht in Tabelle 9.1 deutlich. Demnach sind Holzpellets (z. B. lose Anlieferung, 6 t) energiemengenbezogen in der Regel um ca. 30 % teurer als ofenfertiges Scheitholz (z. B. 33 cm Hartholz). Sie sind sogar um ca. 70 % teurer als Meterholz. Noch deutlicher fällt dieser Unterschied aus wenn – wie häufig in der Praxis – Scheitholz in Eigenregie aufgearbeitet wird und die hierfür erbrachte Arbeitsleistung nicht angerechnet wird.

Die derzeitigen mittleren Holzpelletpreise und ihre Schwankungsbreiten sind in Abb. 9.3 grafisch dargestellt. Der Preisnachteil gegenüber Heizöl ist dagegen mit ca. 10 bis 15 % relativ gering, wenn ein Heizölpreis von 0,35 €/l (bei 3000 l Bezugsmenge) zu Grunde gelegt wird (Stand: Juli 2002).

Die mit Abstand teuersten Holzbrennstoffe stellen die Holzbriketts dar. Sie werden im Durchschnitt für den doppelten Preis von Scheitholz angeboten (Tabelle 9.1). Wenn nur geringe Mengen abgenommen

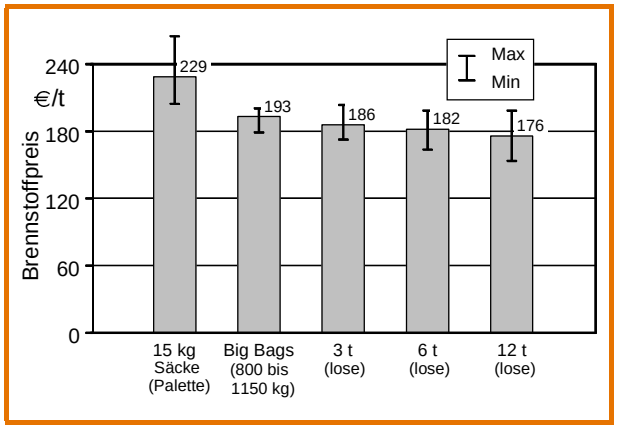


Abb. 9.3: Preise für Holzpellets in Deutschland (inkl. Anlieferung und MwSt, Stand: Nov. 2001)

werden, kann dieser Preisnachteil sogar noch größer sein. Holzbriketts werden aber meist auch nur in kleinen Mengen, z. B. in Einzelfeuerstätten für die Gluterhaltung über Nacht, verwendet und stellen selten den Hauptbrennstoff einer Biomasseheizung dar.

Marktpreise für sonstige Festbrennstoffe. Die relativ hohen Preise für Holzpellets haben in der Praxis in jüngster Zeit das Interesse an der energetischen Verwendung von Getreidekörnern geweckt, obgleich dieser Brennstoff hinsichtlich verschiedener Eigenschaften einige Probleme bereitet (vgl. Kapitel 4 und Kapitel 6.2.1.4). Unter den derzeitigen Preisverhältnissen – Triticale war in 2001 für ca. 102 €/t frei Abnehmer erhältlich /9-6/ – beträgt der energiemengenbezogene Vergleichspreis für Getreidekörner ca. 2,2 ct/kWh, das entspricht etwas mehr als der Hälfte des Holzpelletpreises. Neben den technischen Risiken und dem erhöhten Schadstoffausstoß ist der Einsatz dieses Brennstoffs aber in den meisten Feuerungsanlagen auch rechtlich problematisch (Kapitel 8.4).

Auch die Verwendung von fossiler Kohle kann bei Kleinfeuerungen (insbesondere für Einzelfeuerstätten) in Frage kommen. Allerdings ist ihr Einsatz im Bereich der Haushalte mit Brennstoffmehrkosten gegenüber Scheitholz verbunden. Braunkohlebriketts werden derzeit zu Marktpreisen von 16 bis 18 € je Zentner (50 kg) an Kleinabnehmer abgegeben. Das entspricht einem Preis von ca. 6,8 ct/kWh. Steinkohlebrennstoff wird in Form von „Nüsslein“ zu Preisen von ungefähr 22 bis 24 € je Zentner verkauft, was wegen des höheren Heizwerts einem Preis von ca. 6,2 ct/kWh entspricht. Beide Kohlebrennstoffarten sind für private Heizungsbetreiber somit wesentlich teurer als Holzpellets und Scheitholz.

Im Vergleich zu den privaten Haushalten können industrielle Abnehmer oder Betreiber größerer Feuerungen auf deutlich günstigere Biomassebrennstoffe zurückgreifen. Hierzu zählen vor allem Rinde oder Hackgut aus Sägeresten, die mit durchschnittlich ca. 0,3 bzw. 1,0 ct/kWh (frei Feuerung) zu Buche schlagen /3-15/. Ähnlich günstig sind auch Schwarten und Spreißel aus dem Rohholzzuschnitt im Sägewerk (Tabelle 9.1); dieses Holz muss aber erst noch ofenfertig aufbereitet werden.

Kosten für Waldhackschnitzel. Bei der Berechnung der Hackschnitzelkosten ab Wald sind die Kosten für das Fällen (bei Durchforstung), Rücken, Hacken und Bergen der Hackschnitzel zu berücksichtigen. Für diese Prozesse können jedoch sehr vielfältige Einsatzbedingungen vorliegen (z. B. Brusthöhendurchmesser, Geländebeschaffenheit, Rückeentfernungen), und auch die Verfahren und ihre Mechanisierung (z. B. motormanuell, teilmechanisiert, Vollernteverfahren) können sehr unterschiedlich sein. Das führt dazu, dass die Streuungsbreite der in der Literatur berichteten Gesamtkosten für Waldhackgut sehr hoch ist. Vor allem wurden solche Kosten bislang unter dem Gesichtspunkt einer Belieferung von größeren Heizwerken betrachtet. Bei der Brennstoffbereitung für den Eigenbedarf besteht jedoch die Schwierigkeit, dass die Eigenleistung (Arbeitszeit) und die Verwendung vorhandener Fahrzeuge und Lageräume monetär kaum eindeutig zu bewerten sind. Gleichzeitig sind eventuelle Vergütungen, die beispielsweise von Liefergemeinschaften für Waldhackgut genannt werden, vorsichtig zu interpretieren. Hier besteht meist ein hohes Maß an wirtschaftlicher Verflechtung mit dem Heizwerkbetreiber. Durch Lieferrechte, Genossenschaftsanteile, Beteiligungen oder Investitionskostenzuschüsse spiegeln die Angaben solcher Produzenten kaum einen freien Marktpreis wider.

Zur Orientierung und Kostenabschätzung wurden an der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft umfangreiche Modellrechnungen angestellt /9-5/. Sie zeigen die Abhängigkeit der Kosten vom Brusthöhendurchmesser (BHD) und vom Mechanisierungsgrad. Liegt der BHD beispielsweise bei 20 cm statt bei 10 cm, sinken die Hackschnitzelerzeugungskosten je Schüttraummeter (Srm) von 12,4 auf 8,0 €/Srm (hier: Durchforstung mit motormanuellem Fällen, Rücken mit Zangenschlepper, seilwindenunterstütztes Fällen mit Vorliefern, 200 m Rückentfernung, Mobilhacker). Ein anderes Arbeitsverfahren mit einem niedrigeren Mechanisierungs- und Organisationsaufwand kommt bei Fichtenhackgut je nach BHD auf 12,3 bis 21 €/Srm /9-5/. Hinzu kommen noch die Kosten für die Zwischenlagerung im Wald und den

Endtransport. Auf Basis dieser Zahlen kann davon ausgegangen werden, dass die Vollkosten einer Waldhackschnitzelbereitstellung in einem weiten Bereich um ca. 15 €/Srm schwanken /2-5/, das entspricht einem energiemengenbezogenen Wert von 1,6 ct/kWh. Einzelbetrieblich gerechnet können die Kosten jedoch deutlich nach unten abweichen.

9.2 Anlagenkosten

Bei den Investitionskosten für eine Biomasse-Kleinfeuerung sind verschiedene Anlagenkomponenten und bauliche Aufwendungen zu berücksichtigen, je nachdem, um welche Feuerungsart es sich handelt. Diese Kosten werden nachfolgend beschrieben. Sofern es sich um Komponenten handelt, die von der Systemgröße abhängen, basieren die Angaben auf einer hierzu durchgeführten Erhebung, in der die Listenpreise der meisten in Deutschland anbietenden Hersteller und Vertriebe (inkl. MwSt) ausgewertet wurden.

Einzelfeuerstätten. Am einfachsten ist die Kostenabschätzung für eine Einzelfeuerstätte. Hier sind mit dem Kauf bzw. der Errichtung vor Ort und dem Anschluss an den Schornstein meist sämtliche relevanten Anschaffungskosten abgegolten. In seltenen Fällen müssen evtl. noch Mehrkosten für einen Kamin oder einen zweiten Kaminzug angerechnet werden. Kosten für den Aufstellraum, einen externen Wärmespeicher oder für Lagereinrichtungen entfallen.

Die Bandbreite der Anschaffungskosten einer Einzelfeuerstätte reicht von ca. 700 € für einen Kaminofen aus dem Baumarkt bis über 15 000 € für einen mit hohem handwerklichen Aufwand vor Ort errichteten Kachel- oder Grundofen. Da es sich bei den Einzelfeuerstätten um bauliche Elemente in Wohnräumen handelt, wird die Anlagenauswahl selten ausschließlich nach ökonomischen Gesichtpunkten getroffen. Die Kosten für das Anschließen an einen Kamin einschließlich Abgasrohr und -bogen betragen für einen Kamin- oder Zimmerofen meist weniger als 500 €.

Scheitholz-Zentralheizungen. Im Gegensatz zu den Einzelfeuerstätten besteht bei den Anschaffungskosten für Zentralheizungsanlagen eine starke Abhängigkeit von der installierten Nennwärmeleistung. Das zeigt die Darstellung in Abb. 9.4 (oben links). Anlagennennleistungen zwischen 20 und 60 kW sind hier besonders häufig. In diesem Marktsegment ist mit Preisen von 4 000 bis 10 000 € zu rechnen (nur für den Heizkessel). Anlagen mit abgasgeführter Verbrennungsluftregelung („lambda-geregelt“, vgl. Kapitel 6.1.4.3) sind kaum unter 6 000 € erhältlich, die Mehrkosten liegen normalerweise in der Größenordnung von ca. 20 %. Bei derartigen Anlagen ist im Bereich von 20 bis 60 kW mit spezifischen Anschaffungskosten zwischen 350 und 150 €/kW zu rechnen (ohne weitere Komponenten und Bauteile).

Zusätzlich zu den hier genannten Anschaffungspreisen sind je nach Anwendungsfall meist noch weitere Investitionsaufwendungen, wie z. B. für Pufferspeicher, Installation, Anschluss- und Systembauteile, Schornstein oder Brennstofflagerung, zu kalkulieren.

Hackschnitzelkessel. Ein ähnlicher Verlauf wie bei den Scheitholzkesseln ergibt sich auch für die Kostenfunktion bei Hackschnitzelfeuerungen, nur ist das Niveau des Investitionsbedarfs hier deutlich höher. Im Bereich von ca. 20 bis 60 kW Nennwärmeleistung kann etwa von einer Verdoppelung des Anschaffungspreises gegenüber Scheitholzkesseln ausgegangen werden (Abb. 9.4, oben rechts). Das liegt auch daran, dass die Bauteile, die für eine automatische Beschickung und für den Austrag aus dem Hackschnitzellager benötigt werden, hier miteingerechnet sind. Die spezifischen Anschaffungskosten im Leistungsbereich von 20 bis 60 kW variieren durchschnittlich zwischen 530 und 335 €/kW (ohne zusätzliche Komponenten wie Wärmespeicher, Siloaufbauten oder Installation). Die spezifischen Mehrkosten für eine abgasgeführte Verbrennungsluftregelung sind hier vergleichsweise gering, sie werden daher in Abb. 9.4 (oben rechts) nicht extra ausgewiesen.

Auch bei Hackschnitzelfeuerungen sind in der Regel noch weitere Investitionsaufwendungen erforderlich. Sie betreffen den Pufferspeicher (der zum Teil auch entfallen kann oder deutlich kleiner ausfällt, vgl. Kapitel 6.1.4.4), Installation, Anschluss- und Systembauteile, Schornstein und Brennstofflager. Letzteres betrifft vor allem die bauliche Realisierung des Lagers (z. B. in Gebäuden oder als Hochsilo, mit oder ohne Belüftungskanäle und Gebläse). Der Raumaustrag (Silounterbau) ist dagegen in den oben genannten Anschaffungskosten bereits enthalten.

Pelletkessel. Auf Grund der homogenen Korngrößen und der hohen Schüttdichte von Holzpellets sind bei Pelletfeuerungen eine Reihe von konstruktiven Vereinfachungen möglich, die zu Einsparungen und somit zu einer Senkung der Anschaffungskosten gegenüber Hackschnitzelfeuerungen führen. Für den häufig verwendeten Pellet-Zentralheizungskessel der Leis-

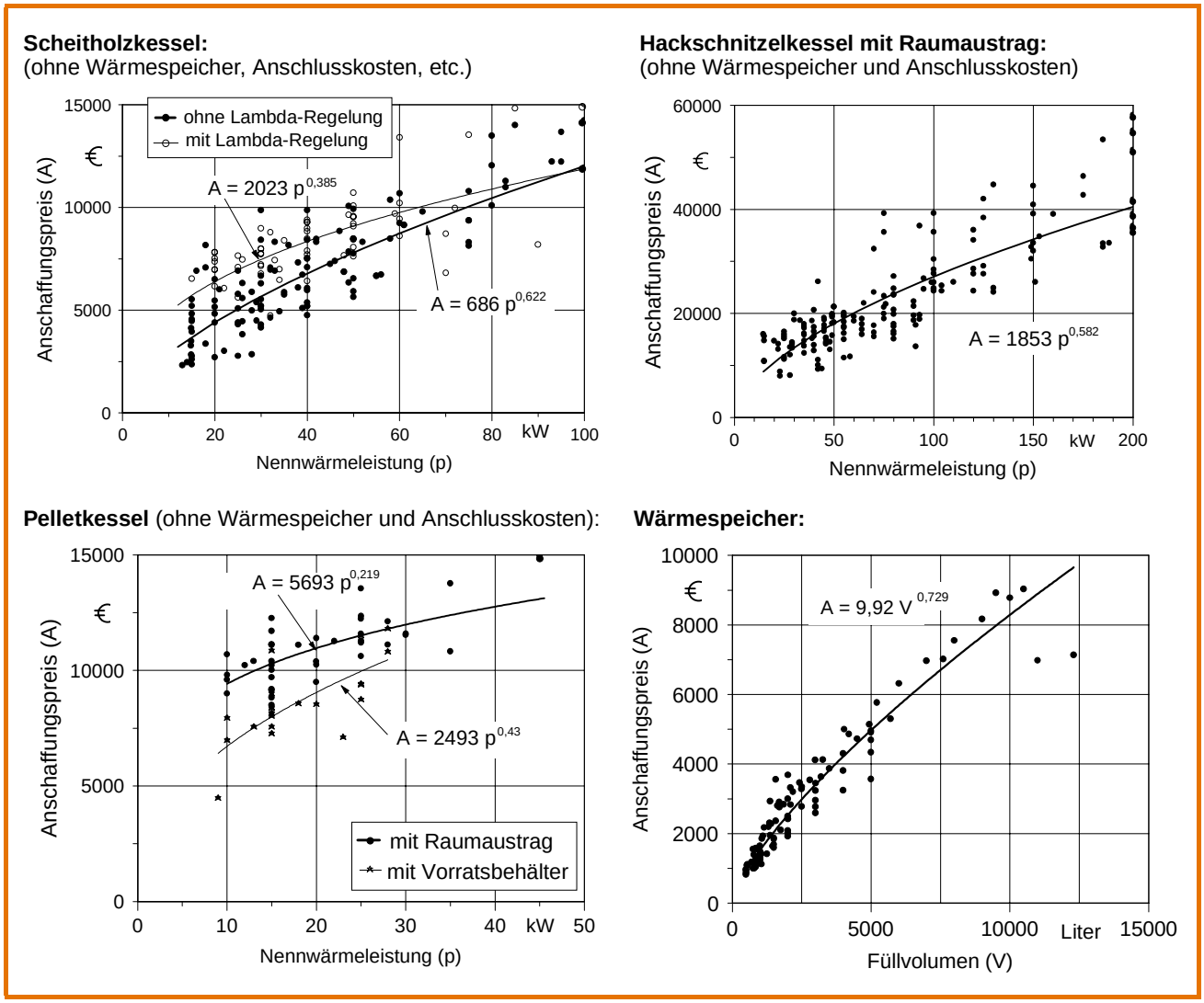


Abb. 9.4: Listenpreise von Zentralheizungskesseln für Holzbrennstoffe bzw. Wärmespeicher (inkl. MwSt) (Stand: 2000, außer Pelletkessel: 2002)

tungsklasse um 15 kW muss mit Anschaffungskosten in Höhe von ca. 7 000 bis 11 000 € gerechnet werden, wobei darin die Brennstoffzuführung und der ggf. dazugehörige Raumaustrag sowie die Mehrwertsteuer bereits enthalten sind.

Allerdings bestehen Unterschiede. Die geringsten Investitionskosten weisen Anlagen auf, bei denen der Kessel in Kompaktbauweise mit einem eigenen Pelletvorratsbehälter verbunden ist. Hier liegen die Anschaffungskosten um ca. 20 bis 30 % niedriger als bei Anlagen mit direktem automatischen Austrag aus einem separaten Pelletlagerraum (Abb. 9.4, unten links). Bei den Kompaktbauweisen erfolgt die Befüllung des Pelletbehälters in der Regel von Hand (z. B. aus Säcken oder mit einer Schubkarre). Diese Anlagen werden daher häufiger im kleineren Leistungsbereich angeboten, sofern nicht auch hier eine automatisierte Befüllung (z. B. über ein Fördergebläse) vorgesehen ist.

Da Pelletheizkessel in den niedrigen Nennwärmeleistungsbereich von weniger als 10 kW vorstoßen, liegen die spezifischen Anschaffungskosten mit durchschnittlich 950 €/kW (bei 10 kW, mit Raumaustrag) scheinbar hoch, allerdings kommen Hackschnitzel oder Scheitholzfeuerungen hierfür nur bedingt in Frage. Unter vergleichbaren Bedingungen (z. B. bei 30 kW) sind Pelletfeuerungssysteme bei den Investitionskosten günstiger als Hackschnitzelanlagen.

Wärmespeicher (Pufferspeicher). Vor allem bei Scheitholzkesseln stellt ein Pufferspeicher einen unverzichtbaren Anlagenbestandteil dar, so dass die hierfür anfallenden Kosten stets in Anrechnung gebracht werden müssen. Ausnahmen sind lediglich bei Hackschnitzel- und Pelletkesseln möglich (Kapitel 6.1.4.4), zumindest können die Speicher hier kleiner dimensioniert werden.

Bei den Pufferspeichern besteht eine klare Abhängigkeit der Anschaffungskosten vom Speichervolumen. Diese Abhängigkeit ist in Abb. 9.4 (unten rechts) dargestellt. Darin werden nur reine Wärmespeicher betrachtet; Kombispeicher (d. h Speicher mit Brauchwassererwärmung) oder kombinierte Holz-Solarwärmespeicher (d. h. Speicher mit Zusatzwärmetauscher, vgl. Kapitel 6.1.4.4), sind darin nicht erfasst. Hierfür muss ggf. mit Zusatzinvestitionskosten gerechnet werden.

Im häufig anzutreffenden Bereich von 1000 bis 5000 l Fassungsvermögen liegen die spezifischen Investitionskosten bei 1,5 bis 1,0 € pro Liter. Für einen Scheitholzkessel mit 30 kW Nennwärmeleistung, für den ein Speichervolumen von 3000 l (d. h. 100 l/kW, vgl. Kapitel 6.1.4.4) empfohlen wird, fallen somit gemäß der Kostenfunktion in Abb. 9.4 Anschaffungskosten in Höhe von 3400 € an.

Halmgutfeuerungen. Im kleinen Leistungsbereich werden automatisch beschickte halmguttaugliche Feuerungen meist als Hackgutfeuerungen mit zusätzlicher Einsetzbarkeit für landwirtschaftliche Brennstoffe vertrieben und eingesetzt. Wegen der aufwändigeren Konstruktion und den höherwertigeren Materialien kommt es zu einer gewissen Steigerung der Anschaffungskosten. Allerdings ist die Zahl solcher Feuerungstypen gering, so dass hier keine eigene Kostendarstellung erstellt wurde, zumal auch diese Anlagen primär als Hackschnitzelfeuerungen deklariert werden. Sie wurden daher bei der Herleitung der allgemeinen Kostenfunktion für Hackgutfeuerungen (Abb. 9.4, oben rechts) mit berücksichtigt.

Bei halmguttauglichen automatisch beschickten Anlagen entstehen die eigentlichen Mehrkosten weniger durch die erhöhte Investition für die eigentliche Feuerung, sondern vielmehr durch die wesentlich aufwändigere Brennstoffvorbehandlung und Zuführung (z. B. Ballenauflöser, Häcksler, Pelletierung). Außerdem kann die Lebensdauer solcher Anlagen bei häufigem Einsatz mit Halmgutbrennstoffen verkürzt sein (Kapitel 6.2.1.4), was wiederum das Gesamtverfahren verteuert. Schließlich sind bei ausschließlicher Verwendung von Halmgut unter Umständen weitere Systemkomponenten wie z. B. eine wirksame Staubabscheidung notwendig.

Über die Investitionskosten von Ganzballenfeuerungen kann hier auf Grund des derzeit kaum gegebenen Praxiseinsatzes solcher Feuerungen keine repräsentative Aussage gemacht werden. Hierzu müssen die Anschaffungskosten auf Basis einer Einzelfallbetrachtung und durch individuell einzuholende Angebote bestimmt werden. Generell sollte dabei jedoch ein relativ hoher Sicherheitszuschlag hinzugerechnet werden.

9.3 Kostenberechnung

9.3.1 Berechnungsgrundlagen

Die für eine Wirtschaftlichkeitsberechnung benötigten Jahreskosten einer Biomasseheizung ergeben sich aus der Summe der kapitalgebundenen, verbrauchsgebundenen, betriebsgebundenen und sonstigen Kosten. Deren Berechnung wird nachfolgend erläutert.

Kapitalgebundene Kosten. Die Kosten für das gebundene Kapital leiten sich aus den erforderlichen Investitionen für die gesamte Anlage ab. Neben der Investitionssumme hat auch die Abschreibungsdauer und der zu Grunde gelegte Zinssatz einen entscheidenden Einfluss auf die Höhe der kapitalgebundenen Kosten.

Die Berechnung der auf ein Jahr bezogenen Investitionskosten erfolgt nach der sogenannten „Annuitätenmethode“. Damit wird die am Anfang der Lebensdauer stehende Investition auf die einzelnen Jahre der Nutzungsdauer umgelegt. Dies erfolgt durch Multiplikation der Investitionssumme mit dem Annuitätenfaktor a, der sich aus Gleichung (9-1) ergibt, wobei i den Zinssatz und T die Nutzungsdauer darstellt.

$$a = \frac{i(1+i)^T}{(1+i)^T - 1} \qquad (9\text{-}1)$$

Der so errechnete periodisch konstante Betrag wird als Annuität bezeichnet, der als Zins und Tilgung für rückzuzahlendes Kapital aufzufassen ist. Dabei ist es prinzipiell unerheblich, ob es sich um Eigen- oder Fremdkapital handelt, hiervon wird lediglich die Höhe des Zinsfußes beeinflusst.

Das folgende Beispiel erläutert den Rechenweg: Eine Scheitholzfeuerungsanlage, die über 20 Jahre genutzt werden soll, wird für insgesamt 10 000 € Gesamtsumme erneuert. Für das aufgewendete Kapital wird ein Zinssatz von 6 % angenommen (z. B. bei 50 % Eigenkapitalnutzung). Mit diesem Zinssatz und der Nutzungsdauer von 20 Jahren wird nun zunächst der Annuitätsfaktor nach Gleichung (9-1) bestimmt (Der Faktor kann auch aus Tabellen abgelesen werden, er wird dann meist als Prozentwert ausgedrückt; z. B. in VDI 2067 /9-7/). Er beträgt hier 0,0872. Dieser

Annuitätenfaktor (auch „Wiedergewinnungsfaktor“) wird nun mit der Investitionssumme von 10 000 € multipliziert. Somit errechnet sich eine jährliche Kapitalkostenbelastung („Annuität“) von 872 €. Wenn es sich um eine Investition mit zugleich technischen und baulichen Anteilen handelt (z. B. Kessel und Lagerraum) ist die Lebensdauer unterschiedlich. Dann werden die Annuitäten beider Kostengruppen zunächst getrennt berechnet und anschließend zu den jährlichen Kapitalkosten aufaddiert.

Die Abschätzung der Nutzungsdauer kann anhand folgender Orientierungswerte erfolgen (nach /9-7/):

- allgem. Baukosten (z. B. Gebäude): 50 Jahre
- Schornstein (im Gebäude): 50 Jahre
- Heizkessel: 20 Jahre
- Wärmespeicher, Installationsbauteile: 15 bis 20 Jahre
- erdverlegte Nahwärmeleitungen: 25 bis 35 Jahre

Verbrauchsgebundene Kosten. Hierzu zählen Brennstoff- und Hilfsenergiekosten. Den weitaus größten Anteil machen die Brennstoffkosten aus, die sich aus den Preisen in Kapitel 9.1 ergeben.

Die benötigte Brennstoffmenge errechnet sich aus dem Netto-Nutzwärmebedarf für Heizung und Warmwasser zuzüglich der jeweiligen Nutzungsgradverluste. Soll beispielsweise eine Wärmemenge von 30 000 kWh pro Jahr erzeugt werden, ist bei einem Netto-Jahresnutzungsgrad von 75 % eine Brennstoffenergie von 40 000 kWh/a aufzuwenden (entspricht 4000 l Heizöl). Diese Brennstoffmenge entspricht einem Volumen von 20,5 Rm trockenem Buchenholz (zur Umrechnung: vgl. Planungszahlen in Kapitel 4.4). Bei einem angenommenen Preis von 49 €/Rm entstehen somit Beschaffungskosten von etwa 1000 € pro Jahr.

Weitere verbrauchsgebundene Kosten entstehen für elektrischen Strom (Hilfsenergie). Hierbei handelt es sich um Antriebsenergie für die Feuerungsanlage selbst (u. a. für Verbrennungsluftgebläse, Brennstoffförderung, Regelung). Dieser Stromverbrauch wird häufig pauschal mit 0,7 % der thermischen Arbeit angesetzt /2-5/. Bei Scheitholzfeuerungen kann er in der Praxis aber auch niedriger liegen.

Wird eine Hackschnitzelbelüftung verwendet, fallen weitere Stromkosten an. Wenn es sich hierbei um eine Belüftungskühlung handelt (Kapitel 3.5.2) kann als Faustzahl ein Stromverbrauch von ca. 10 kWh je Kubikmeter Hackschnitzel angesetzt werden (nach /9-1/). Bei einer Belüftungstrocknung liegt dieser Ansatz dagegen deutlich höher.

Betriebsgebundene Kosten. Die Betriebskosten beinhalten alle Aufwendungen für Wartung und Instandhaltung sowie die Kosten für die Bedienungsarbeit, die Emissionsmessungen und die Entsorgung der Verbrennungsrückstände (wobei Letztere bei Kleinfeuerungen meist vernachlässigbar sind).

Wartung und Instandsetzung. In Modellrechnungen werden die Wartungs- und Instandsetzungskosten häufig vereinfachend pauschal mit jährlich 1,5 % der Gesamtinvestitionssumme angesetzt /2-5/. Wenn jedoch ein Teil der Wartungs- und Reparaturarbeiten vom Betreiber in Eigenregie geleistet wird, kann der genannte Pauschalansatz auch niedriger sein. Das gilt auch, wenn die Kosten des Kaminkehrers, die teilweise in dem genannten Pauschalansatz enthalten sind (z. B. Fegegebühr), separat angesetzt werden.

Die Abschätzung der Wartungs- und Instandhaltungskosten kann auch differenzierter anhand folgender Orientierungswerte durchgeführt werden (nach /9-7/):

- Gebäude und bauliche Investition: 1 %
- Schornstein (im Gebäude): 1 %
- Heizkessel: 1,5 %
- Wärmespeicher, Installationsbauteile: 2 %
- erdverlegte Nahwärmeleitungen: 2 %

Kaminkehrerkosten. Für die Leistungen des Kaminkehrers gelten je nach Feuerungsanlage und Bundesland unterschiedliche Gebührensätze. Zur Orientierung werden sie in Tabelle 9.2 exemplarisch für das Bundesland Bayern dargestellt. Demnach verursacht eine handbeschickte Holz-Zentralheizung Kaminkehrerkosten von jährlich ca. 100 €, während bei Hackschnitzelfeuerungen ca. 130 €/a anfallen. Der Unterschied ergibt sich zum Teil durch die jährlichen CO- und Staubemissionsmessungen, die bei Hackschnitzelfeuerungen jährlich, bei Scheitholzkesseln aber nur einmalig nach der Inbetriebnahme vorgeschrieben sind (vgl. Kapitel 8.5.3).

Arbeitskosten. Beim Betrieb einer Kleinfeuerung für Biomasse sind durch den Betreiber wesentlich höhere Arbeitsleistungen zu erbringen als beispielsweise für eine Öl- oder Gasfeuerung. Die Arbeiten betreffen die regelmäßige Entaschung (d. h. z. B. Entleerung des Aschekastens ca. alle 2 bis 4 Wochen, bei Halmgut häufiger) die Reinigung der Wärmetauscherzüge (z. B. alle 4 Wochen, bei Halmgut z.T. wöchentlich) und die Überwachung der Anlage. Bei handbeschickten Anlagen kommt noch das Anzünden und die Brennstoffbeschickung hinzu. Wenn es sich um eine

Tabelle 9.2: Beispiel für die jährlichen Kehr- und Überprüfungsgebühren von häuslichen Holz-Zentralheizungsanlagen ab 15 kW Nennwärmeleistung (hier für 11 m Kaminhöhe, 0,90 m Rauchrohr, Lüftungsanlage, Standort Bayern; Stand: 2002). Angaben inkl. MwSt (nach /9-4/)

Maßnahme	handbeschickte Anlage		automatisch beschickte Anlage	
	Häufigkeit/a	Preis/a (€)	Häufigkeit/a	Preis/a (€)
Kaminreinigung	4x	66,21	2x	33,10
Rauchrohrreinigung	1x	5,48	1x	5,48
Lüftung prüfen	1x	0,72	1x	0,72
Erstmessung Emissionen[a]	0,05x[a]	5,86[a]		–
wiederkehrende Emissionsmessung		–	1x	69,53
Filterhülse mit Auswertung		–		19,57
Ausbrennen[b]		23,68		–
Ausbrennmaterial[c]		2,16		–
Summe pro Jahr		*104,11*		*128,40*

a. Anteilig pro Jahr, bei 20 Jahren Nutzungsdauer
b. Mittelwert
c. bei modernen Anlagen heute kaum noch erforderlich

private Feuerung ohne Wärmelieferung an Dritte handelt, können derartige Arbeiten jedoch kaum in Anrechnung gebracht werden. Erst bei einer Mehrfamilienhausvariante oder bei vorhandenen Wärmelieferverpflichtungen können hierfür auch die Arbeitskosten (z. B. Hausmeisterkosten) berechnet werden.

Sonstige Kosten. Hierzu zählen Versicherungen, Steuern und Abgaben, Verwaltungskosten und – bei gewerblicher Wärmebereitstellung – Gewinnaufschläge oder auch Verluste. Bei Kleinfeuerungen, die in der Regel zur Versorgung privater Haushalte verwendet werden, fallen davon lediglich Versicherungskosten an. Diese werden häufig mit jährlich 0,5 % der Investitionssumme pauschal angesetzt.

Förderung. Die Nutzung von Biomasse als Brenn- und Kraftstoff wird durch diverse Förderprogramme von EU, Bund, Ländern, Kommunen und Energieversorger unterstützt. Je nachdem, ob Fördermittel oder Beihilfen angerechnet werden können, kann sich die Wirtschaftlichkeit von Biomassefeuerungen deutlich verbessern. Wenn es sich hierbei um Investitionskostenzuschüsse handelt, müssen diese bei der Kostenrechnung von der Investitionssumme abgezogen werden, so dass nur noch der verbliebene Anteil der Investition annuitätisch auf die jeweilige Lebensdauer verteilt werden kann. Bei zinsverbilligten Darlehen kommt es entsprechend zu einem reduzierten Zinsfuß, der ebenfalls über den Annuitätsfaktor (siehe „kapitalgebundene Kosten“) in die Berechnung mit eingeht. Informationen über aktuelle Förderprogramme und Mittelvergabe sind u. a. bei den im Anhang F genannten Stellen erhältlich.

9.3.2 Beispielrechnungen

In Tabelle 9.3 werden einige Kostenrechnungsbeispiele für verschiedene Versorgungsaufgaben dargestellt. Dabei handelt es sich um zwei Einfamilienhäuser (EFH) mit unterschiedlicher Wärmenachfrage und ein Mehrfamilienhaus (MFH). Bei den Einfamilienhäusern wurde sowohl ein Gebäude nach dem heutigen Wärmedämmstandard (Niedrigenergiehaus, EFH I) als auch ein bestehendes Einfamilienhaus (Altbau) mit durchschnittlicher Wärmedämmung (EFH II) betrachtet. Das Mehrfamilienhaus (MFH) entspricht einem Gebäude mit etwa 15 Wohneinheiten, das nach dem heutigen Wärmedämmstandard errichtet wurde.

In den Berechnungen erweist sich die Wärmeerzeugung in scheitholzbefeuerten Anlagen verglichen mit pellet- und hackgutbefeuerten Anlagen als die kostengünstige Variante unter den Biomassebrennstoffen. Das liegt zum Teil an den geringeren baulichen Aufwendungen für das Lager sowie am Fehlen eines automatischen Lageraustrags. Außerdem ist der hier angesetzte Preis für den Brennstoff deutlich niedriger, als der Pelletpreis.

Im Vergleich zu Pelletanlagen sind Hackschnitzelfeuerungen bei gleicher Anlagengröße durch etwas höhere Gesamtinvestitionskosten gekennzeichnet. Das liegt unter anderem am höheren Lagervolumen (geringere Schüttdichte als bei Pellets) und – zumindest bei größerer Anlagenleistung – an den höheren Anschaffungskosten für den Kessel und den Lageraustrag. Im dargestellten Berechnungsbeispiel werden diese höheren Investitionen aber durch die deutlich niedrigeren Brennstoffkosten überkompensiert, so dass die mit Hackschnitzeln erzeugte Kilowattstunde schließlich kostengünstiger ist als beim Pelletkessel (Tabelle 9.3).

Ein solcher Vergleich ist jedoch für das Niedrigenergiehaus nicht möglich, da für diesen Leistungs-

Tabelle 9.3: Berechnungsbeispiele für die Wärmegestehungskosten in verschiedenen Kleinanlagen für verschiedene Versorgungssituationen: EFH I Einfamilienhaus mit Niedrigenergiestandard, EFH II Einfamilienhaus mit geringem Wärmedämmstandard (Altbau), MFH Mehrfamilienhaus (Berechnungen inkl. MwSt, Werte z. T. gerundet)

Versorgungsfall		**EFH I**			**EFH II**			**MFH**	
Leistungsbedarf in kW		**5**	**5**	**5**	**18**	**18**	**18**	**60**	**60**
Brennstoff		**Heizöl**	**Scheite**	**Pellets**	**Scheite**	**Hackgut**	**Pellets**	**Hackgut**	**Pellets**
tatsächliche Kessel-Nennleistung in kW[a]		**9**	**14,9**	**9**	**25**	**18**	**18**	**60**	**60**
Anlagen und Betriebsdaten:									
Wärmebedarf Heizung u. Brauchwasser	MWh/a	10	10	10	34	34	34	140	140
Gesamtnutzungsgrad (inkl. Brauchwasser)	%	85%	70%	78%	75%	78%	80%	78%	82%
Brennstoffeinsatz	MWh/a	11,8	14,3	12,8	45,3	43,6	42,5	179,5	170,7
Arbeitszeitbedarf für Reinigung und Betrieb	h/a	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	50	15
Häufigkeit der Kaminkehrung pro Jahr		4	4	4	4	2	2	2	2
Investitionen:									
Heizraum und Kamin	_	3 000	3 000	3 000	5 500	5 500	5 500	8 000	8 000
Lagerung/Tank	_	2 000	500	3 000	500	5 000	3 500	8 000	5 000
Lagerbelüftungseinrichtung (Außenluft)	_	–	–	–	–	1 500	–	3 500	–
Feuerungsanlage komplett mit Regelung[bc]	_	4 000	5 724	6 413	6 986	9 964	10 721	20 080	13 956
Wärmespeicher[b]	_	–	1 734	725	2 529	1 201	1 201	2 889	2 889
Brauchwasserspeicher (inkl. Regelung)	_	1 000	1 000	1 000	1 000	1 000	1 000	2 000	2 000
Installationsteile[d]	_	800	800	800	1 000	1 000	1 000	1 300	1 300
Lieferung, Montage, Inbetriebnahme	_	1 200	1 200	1 000	1 300	1 300	1 300	2 000	2 000
Summe bauliche Investitionen	_	5 000	3 500	6 000	6 000	10 500	9 000	16 000	13 000
Summe Investitionen Technik/Installation	_	*7 000*	*10 458*	*9 937*	*12 815*	*15 965*	*15 222*	*31 768*	*22 144*
kapitalgebundene Kosten[e]:									
Annuität für bauliche Investitionen	€/a	340	238	407	407	713	611	1 087	883
Annuität für Technik/Installation	€/a	635	949	902	1 163	1 449	1 382	2 883	2 010
Summe kapitalgebundene Kosten	€/a	*975*	*1 187*	*1 309*	*1 570*	*2 162*	*1 993*	*3 970*	*2 893*
verbrauchsgebundene Kosten:									
Brennstoffkosten[f]	€/a	417	362	511	1 149	709	1 695	2 919	6 807
Hilfsstromverbrauch (0,7 % der therm. Arbeit)	€/a	7	7	7	24	24	24	98	98
Lagerbelüftung (elektr. Strom)	€/a	–	–	–	–	47	–	195	–
Summe verbrauchsgebundene Kosten	€/a	*424*	*369*	*518*	*1 173*	*780*	*1 718*	*3 211*	*6 905*
betriebsgebundene Kosten:									
Wartung/Instandsetzung baulicher Teil[g]	€/a	50	35	60	60	105	90	160	130
Wartung/Instandsetzung Maschinentechnik[h]	€/a	105	157	149	192	239	228	477	332
Arbeitskosten für Reinigung und Betrieb[i]	€/a	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	685	206
einmalige/wiederkehr. Emissionsmessung	€/a	1,35	–	–	6	89	89	89	89
Schornsteinfegen/Kaminkehrerleistungen[j]	€/a	72	72	72	72	39	39	39	39
Summe betriebsgebundene Kosten	€/a	*229*	*264*	*281*	*331*	*473*	*447*	*1 450*	*796*
sonstige Kosten:									
Versicherung[k]	€/a	60	70	80	94	132	121	239	176
Summe jährliche Gesamtkosten	€/a	*1 687*	*1 890*	*2 189*	*3 168*	*3 547*	*4 279*	*8 870*	*10 770*
Kosten der Nutzenergiebereitstellung	€/kWh	*0,169*	*0,189*	*0,219*	*0,093*	*0,104*	*0,126*	*0,063*	*0,077*

a. zur Verbesserung des Heizkomforts oder wegen fehlender Marktabdeckung wurde die Nennwärmeleistung höher angesetzt
b. gemäß Kostenfunktionen in Abb. 9.4
c. bei Hackgut und Pellets inkl. Raumaustrag
d. Speicherladepumpe, Rücklaufanhebung, Sensoren, Druckausgleichsgefäß, etc.
e. bei einem Zinssatz von 6,5 % und einer Abschreibungsdauer über die technische Lebensdauer (Kessel, Pufferspeicher, Lageraustrag und Brauchwasserbereitung etc. 20 Jahre; Heizraum, Lagerraum und Kamin 50 Jahre)
f. Heizöl 0,35 €/l, Buchenscheitholz 50 €/Rm, Waldhackschnitzel 15 €/m^3 (bei w=45 % und ñ=200 kg/m^3 atro), Pellets 182 €/t
g. 1 % der baulichen Investition
h. 1,5 % der maschinentechnischen Investition
i. Bruttolohn 13,71 €/h
j. Rauchrohrreinigung und Lüftung prüfen
k. 0,5 % der Gesamtinvestition
n.b. = nicht berücksichtigt (Eigenleistung)

bedarf keine Hackschnitzelfeuerungen angeboten werden. Zwar werden auch Scheitholzfeuerungen nicht mit einer derart niedrigen Leistung angeboten, hier ist es aber praxisüblich, dass eine etwas über dem eigentlichen Leistungsbedarf liegende Nennwärmeleistung angesetzt wird, da dadurch der Bedienkomfort erhöht wird (vgl. Kapitel 6.1.4.4).

In Abhängigkeit von der Anlagengröße und dem eingesetzten Brennstoff liegen die Wärmegestehungskosten (einschließlich Brauchwasser) zwischen 0,06 und 0,22 €/kWh. Vergleicht man unterschiedliche Brennstoffe miteinander (EFH II), zeigen scheitholzbefeuerte Anlagen und Hackschnitzelfeuerungen geringe Unterschiede während die Pelletfeuerung hier deutlich höher liegt.

Einen großen Einfluss üben hierbei die Brennstoffkosten aus. Bei Scheitholz und Hackschnitzeln sind hierbei im Einzelfall auch noch weitere Kostensenkungen möglich, wenn – wie in der Praxis vielfach üblich – die Arbeitsleistung bei ihrer Beschaffung nicht angesetzt wird (z. B. bei Selbstwerbung). In diesem Fall würde sich der Kostenabstand zur Wärmeerzeugung aus Pellets weiter vergrößern, da die Marktpreise für diesen Brennstoff unbeeinflusst bleiben.

Hohe spezifische Wärmegestehungskosten treten bei den Niedrigenergiehäusern mit nur 5 kW Leistungsbedarf auf. Sie werden hauptsächlich von den jährlichen Kosten der Investition (Annuitäten) bestimmt, die hier zwischen 59 und 63 % der Gesamtkosten ausmachen. Die Brennstoffkosten spielen hier dagegen nur eine untergeordnete Rolle. Mit jährlich zwischen 1 650 € (Heizölfeuerung), und 2 250 € (Pelletfeuerung) sind die Nutzwärmekosten jedoch insgesamt deutlich niedriger als bei der Versorgungsaufgabe EFH II mit geringerem Wärmeschutzstandard (Tabelle 9.3).

10 Stationäre Nutzung von Pflanzenölen

Die Verwendung naturbelassener Pflanzenöle zur Kraft-Wärme-Kopplung in Blockheizkraftwerken (BHKW) mit hoher Ausnutzung des Energieinhaltes des Kraftstoffes spielt eine immer wichtigere Rolle. Insbesondere pflanzenöltaugliche Aggregate im unteren Leistungsbereich werden verstärkt als ein Baustein im Gesamtkonzept einer dezentralen Strom- und Wärmeversorgung mit regenerativen Energieträgern nachgefragt. Unter anderem ist dies auch auf zunehmende Anforderungen des Boden- und Gewässerschutzes in umweltsensiblen Bereichen zurückzuführen (z. B. Alpenregion, Wasserschutzgebiete). Hinzu kommt die verbesserte Wirtschaftlichkeit durch die im Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) /10-9/ festgeschriebenen Mindestvergütungssätze für die Einspeisung von Strom aus biogenen Brenn- und Treibstoffen (z. B. in Anlagen bis 500 kW_{el} derzeit 0,101 €/kWh). Nachfolgend wird daher die dezentrale Gewinnung und Nutzung von Pflanzenöl als Kraftstoff in stationären Anlagen vorgestellt.

10.1 Ölgewinnung und -reinigung

In Mitteleuropa kommen hauptsächlich Raps und Sonnenblumen als Ölsaaten für die Produktion von Kraftstoffen auf Pflanzenölbasis in Frage. Raps beispielsweise enthält im lagerfähigen Zustand etwa 43 % Öl, 40 % Rohprotein und Extraktstoffe, 7 % Wasser, 5 % Rohfaser und 5 % Asche. Ziel der verschiedenen Ölgewinnungsverfahren ist es, den Ölanteil aus der Saat möglichst effizient abzutrennen, wobei unerwünschte Bestandteile aus dem Samenkorn nicht in das Öl überführt bzw. aus diesem entfernt werden sollen. Nachfolgend werden die Produktionsmöglichkeiten vorgestellt.

Ölgewinnung. Für die Gewinnung von Pflanzenöl gibt es zwei verschiedene gängige Produktionsverfahren, das Abpressen und Extrahieren der Ölsaat in industriellen Ölmühlen mit Tagesleistungen von maximal 4 000 t Ölsaat und das ausschließlich mechanische Abpressen in kleineren dezentralen Ölmühlen mit etwa 0,5 bis 25 t/Tag /10-28/.

Die Verfahrensschritte bei der Pflanzenölgewinnung in zentralen Großanlagen sind:

- Vorbehandlung der Ölsaat (Reinigung, Trocknung, evtl. Schälung, Zerkleinerung, Konditionierung)
- Ölgewinnung (mechanische Vorpressung, Rückstand wird durch Lösungsmittelextraktion weiter entölt)
- Nachbehandlung des Extraktionsschrots (Entfernung und Rückgewinnung des Lösungsmittels)
- Raffination (Entfernen der bei der Extraktion eingetragenen unerwünschten Begleitstoffe durch Entschleimung, Entsäuerung, Bleichung, Desodorierung)

In dezentralen kleineren Anlagen wird auf viele dieser Verfahrensschritte verzichtet. Hier sind bei der Ölgewinnung die folgenden Prozessschritte zu nennen:

- Vorbehandlung der Ölsaat (Reinigung, Trocknung, evtl. Walzung)
- Ölgewinnung durch Kaltpressung (ausschließlich mechanische Entölung, meist durch Schneckenpressen)
- Ölreinigung (Abscheidung von Trubstoffen durch Sedimentation, Filtration oder Zentrifugation)

Während die Ölausbeute in Großanlagen bei etwa 99 % liegt kommen dezentrale Anlagen lediglich auf ca. 80 % Ölausbeute. Anders als bei den Großanlagen werden hier fast ausschließlich Schneckenpressen verwendet (Abb. 10.1). Bei einer Tageskapazität von ca. 1,0 bis 2,0 t Ölsaat/Tag ist mit Anschaffungskosten für die Schneckenpresse (ohne Fördertechnik, Lagerung etc.) von ca. 8 000 bis 15 000 € zu rechnen.

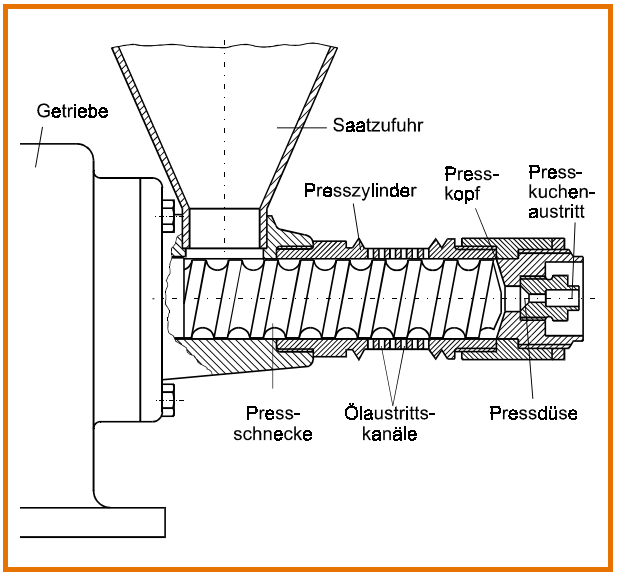


Abb. 10.1: Schnitt durch eine Schneckenpresse mit perforiertem Presszylinder /10-28/

Ölreinigung. Das gewonnene Pflanzenöl enthält etwa 0,5 bis 6 Gew.-% Feststoffe (ölfrei), die aus den festen Bestandteilen des Ölsamens bestehen. Die Feststoffe müssen möglichst vollständig aus dem Öl entfernt werden, da die Ölreinheit, d. h. der als „Gesamtverschmutzung" bezeichnete Gehalt an Feststoffen sowie deren Korngrößenverteilung, ein wichtiges Qualitätsmerkmal für die Nutzung in Verbrennungsmotoren ist. In kleineren dezentralen Anlagen mit Tageskapazitäten bis zu ca. 0,7 t Ölsaat/Tag ist für die Ölreinigung der Einsatz einer einfachen und relativ kostengünstig zu betreibenden Sedimentationsanlage möglich (Abb. 10.2). Bei einer Tageskapazität von ca. 0,35 t/Tag ist mit Anschaffungskosten für die Ölreinigung von ca. 7 500 € zu rechnen.

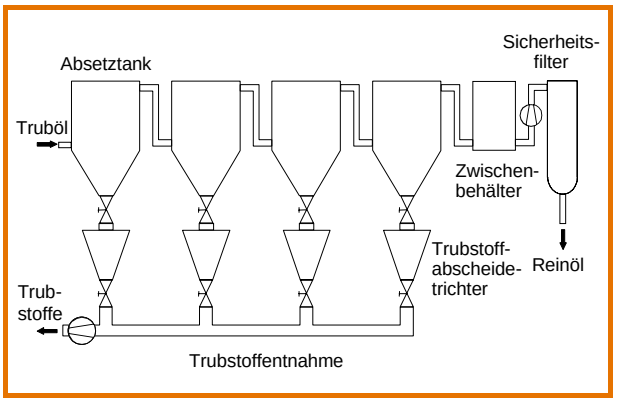


Abb. 10.2: Kontinuierliche Sedimentation für Pflanzenöl /10-28/

10.2 Kraftstoffeigenschaften

Um Pflanzenöle als Kraftstoff in Motoren einsetzen zu können, werden zwei Wege beschritten, die Anpassung des Kraftstoffs an den Motor oder die Anpassung des Motors an den (weitgehend naturbelassenen) Kraftstoff. Bei der Anpassung des Kraftstoffs wird versucht, das Pflanzenöl durch chemische Veränderungen (z. B. Umesterung zu Rapsölmethylester, d. h. „RME") so zu verändern, dass dessen kraftstofftechnische Eigenschaften dem Dieselkraftstoff ähnlich werden; das Gleiche ist auch durch Additivierung oder Verarbeitung in Mineralölraffinerien möglich /10-28/. Da solche umgewandelten Kraftstoffe vornehmlich für den Transportbereich (Verkehrssektor) hergestellt werden, sollen sie hier nicht betrachtet werden. Statt dessen werden nachfolgend nur die Eigenschaften des naturbelassenen Pflanzenöls vorgestellt.

Zusammensetzung und Merkmale. Naturbelassenes Pflanzenöl besteht zu 77 bis 78 Gew.-% aus Kohlenstoff (C), zu 11 bis 12 % aus Wasserstoff (H) und zu 10 bis 11 % aus Sauerstoff (O). Pflanzenöle und ihre Ester sind schnell biologisch abbaubar und weisen eine geringe Toxizität im Vergleich zu Diesel- oder Ottokraftstoff auf. Bei der Lagerung können Umsetzungsvorgänge stattfinden, sie sind abhängig von der Vorgeschichte des Öls und den herrschenden Lagerungsbedingungen (u. a. Tankmaterial, Temperatur, Sauerstoff, Licht, Wasser). Es finden sogenannte Autoxidations- und Polymerisierungsprozesse statt, die durch geeignete Produktions- und Lagerbedingungen vermindert werden können (vgl. Kapitel 10.4). Unter günstigen Bedingungen sind naturbelassene Pflanzenöle etwa 6 bis 12 Monate lagerfähig.

Die Kraftstoffeigenschaften von Pflanzenölen weichen in einigen wesentlichen Punkten von der gültigen Norm für Dieselkraftstoffe (DIN EN 590) ab. Vor allem die hohe „Zähflüssigkeit", ausgedrückt durch die um den Faktor 10 höhere Viskosität (Tabelle 10.1), ist häufig dafür verantwortlich, dass in herkömmlichen vor allem direkt einspritzenden Dieselmotoren beim Betrieb mit Pflanzenöl die Zerstäubungsqualität während des Einspritzvorgangs sowie die Verbrennungsgüte unzureichend ist und Ablagerungen im Bereich der Zylinderbuchsen, Kolben, Ventile und Einspritzdüsen auftreten. Deshalb ist naturbelassenes Pflanzenöl – anders als beispielsweise RME – nicht als Kraftstoff für konventionelle direkteinspritzende Dieselmotoren geeignet. Ähnlichkeit mit Diesel besteht aber im Heizwert (bezogen auf das Volumen). Diesel-

Tabelle 10.1: Ausgewählte Kennwerte von Kraftstoffen gemäß den entsprechenden Normen

Parameter	Diesel-kraftstoff (DIN EN 590)	Biodiesel (FAME) (prEN 14 214)	Rapsöl, natur-belassen[a]
Dichte (15 °C) in kg/m^3	820 - 845	860 - 900	ca. 920
Kinematische Viskosität (40 °C) in mm^2/s	2,0 - 4,5	3,5 - 5,0	ca. 35
Flammpunkt in °C	über 55	über 101	ca. 231
Schwefelgehalt in mg/kg	max. 350	max. 10	ca. 4
Heizwert massebezogen (MJ/kg) volumetrisch (MJ/l)	42,7[a] ca. 35,6[a]	39,7[a] ca.35,1	ca. 38,2 ca. 35,1

a. Literaturwerte

Tabelle 10.2: Anforderungen des „RK-Qualitätsstandard“ für Rapsöl als Kraftstoff /10-16/ (Stand: 05/2000)

Eigenschaften/Inhaltsstoffe	Einheit	Grenzwert
charakteristische Eigenschaften:		
Dichte (15 °C)	kg/m^3	900 - 930
Flammpunkt	°C	min. 220
Heizwert	MJ/kg	min. 35
Kinematische Viskosität (40 °C)	mm^2/s	max. 38
Koksrückstand	Gew.-%	max. 0,4
Jodzahl	g/100 g	100 bis 120
Schwefelgehalt	mg/kg	max. 20 (oder 0,002 Gew.-%)
variable Eigenschaften:		
Gesamtverschmutzung	mg/kg	max. 25
Oxidationsstabilität (110 °C)	h	min 5
Neutralisationszahl	mg KOH/g	max. 2,0
Phosphorgehalt	mg/kg	max. 15
Aschegehalt	Gew.-%	max. 0,01
Wassergehalt	Gew.-%	max. 0,075

kraftstoff besitzt zwar auf die Masse bezogen einen höheren Heizwert als naturbelassenes Pflanzenöl, beim volumenbezogenen Heizwert wird dieser aber durch die niedrigere Dichte nahezu kompensiert, so dass der Kraftstoffverbrauch eines Motors in etwa gleich bleibt (Tabelle 10.1). Rapsöl weist somit gegenüber Diesel bzw. extra leichtem Heizöl nur einen um ca. 1,5 % geringeren volumenbezogenen Heizwert auf. Das gilt auch für RME.

Qualitätsanforderungen. Als Grundlage für einen sicheren motorischen Betrieb gilt der „Qualitätsstandard für Rapsöl als Kraftstoff (RK-Qualitätsstandard)“ (Tabelle 10.2). Ähnlich wie in den Normen für Dieselkraftstoff (DIN EN 590) und Fettsäuremethylester (prEN 14 214 /10-4/) sind hier die wesentlichen Mindestanforderungen an Rapsöl für die Verwendung als Kraftstoff in dafür geeigneten Motoren zusammengestellt.

10.3 Energetische Nutzung

10.3.1 Pflanzenölmotoren

Wie bei konventionellen Dieselmotoren werden auch bei Pflanzenölmotoren direkt einspritzende Verfahren (DI) und indirekt einspritzende (IDI) Verfahren mit einer Vor- oder Wirbelkammer unterschieden. Insbesondere bei den direkt einspritzenden Motoren kann weiterhin zwischen speziell für Pflanzenöl entwickelten oder weiterentwickelten Motoren und umgerüsteten Serienmotoren unterschieden werden /10-28/.

Beim Vor- oder Wirbelkammerverfahren verläuft die Verbrennung im Motor in zwei Stufen. Durch den bei der Teiloxidation in der Nebenkammer entstehenden Druck strömt der Kammerinhalt in die Hauptkammer. Dort wird das Gemisch mit der sich darin befindlichen Luft stark verwirbelt, wodurch sich die Verbrennung fortsetzt. Auf Grund des großvolumigen Brennraums, der starken Verwirbelung des Kraftstoff/Luft-Gemisches und der längeren Verweilzeit des Kraftstoffs in der Brennkammer sind Vor- und Wirbelkammermotoren meist besser für die Verbrennung von Pflanzenöl geeignet, als direkteinspritzende Motoren.

Direkt einspritzende pflanzenöltaugliche Motoren unterscheiden sich meist deutlich von konventionellen Dieselmotoren. Charakteristische Merkmale können eine halbkugelförmige Brennmulde im Kolben (bzw. im Zylinderkopf) sowie die Verwendung von Einloch-Einspritzdüsen für die bessere Zerstäubung des hochviskosen Pflanzenölkraftstoffs sein.

Der wohl bekannteste pflanzenöltaugliche Motor mit Direkteinspritzung arbeitet nach dem sogenannten „Duotherm-Verfahren“ (Elsbett). Hier wird mit einer Einloch-Zapfendüse der Kraftstoff tangential in die Brennmulde eingespritzt. Der entstehende Gemischwirbel sorgt dafür, dass im Inneren des Brennraums eine zentrale heiße Brennzone entsteht,

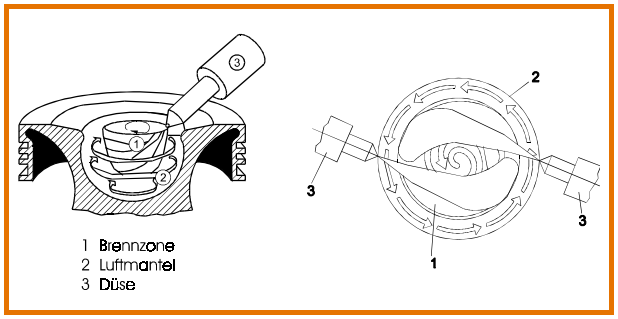


Abb. 10.3: Prinzip des Elsbett Duotherm-Verfahrens (nach /10-5/)

während im äußeren Bereich die Wärmeübertragung an die Kolbenwand vermindert werden soll (Abb. 10.3, links). Leistungsstärkere Motortypen sind mit zwei gegenüberliegenden Einspritzdüsen ausgestattet (Doppel-Duotherm-Verfahren; Abb. 10.3, rechts). Ein geteilter Gelenkkolben mit einem Stahl- oder Graugussoberteil dichtet den Brennraum gut ab und minimiert die Wärmeverluste. Die Wärmeabfuhr erfolgt über den spritzölgekühlten Aluminium-Gleitschuh.

Neben den speziell für naturbelassenes Pflanzenöl konstruierten Dieselmotoren ist auch eine Umrüstung von Seriendieselmotoren (Vor- und Wirbelkammermotoren sowie Direkteinspritzer) auf Pflanzenölbetrieb möglich (u. a. durch Kraftstoffvorwärmung, Modifikationen des Brennraumes, der Einspritzdüsen und der Einspritzelektronik). Derartige Motorumrüstungen setzen sich im Vergleich zu Spezialmotoren auch verstärkt durch. Erste Erfahrungen sind überwiegend positiv.

Bei einer Umrüstung ist ferner darauf zu achten, dass die am Motor vorhandenen kraftstoffführenden Komponenten (v. a. Einspritzpumpe, Dichtungen, Leitungen etc.) beständig gegenüber dem Langzeiteinsatz von Pflanzenöl sind. Die Auswahl von technisch ausgereiften Motorbauteilen in hoher Verarbeitungsqualität ist in Hinblick auf die allgemein stärkere Beanspruchung der Materialien (höhere Viskosität des Pflanzenöls) empfehlenswert. Unbedingt zu vermeiden ist die Verwendung von katalytisch wirksamen Materialien wie z. B. Kupfer, bzw. kupferhaltige Legierungen (z. B. Messing).

10.3.2 Pflanzenöl-BHKW

Ein Blockheizkraftwerk besteht aus einem oder mehreren BHKW-Modulen mit den notwendigen Hilfseinrichtungen, Schalt- und Steuerungseinrichtungen, Schallschutzdämmung, Abgasabführung sowie dem Aufstellraum. Hauptbestandteil eines BHKW-Moduls ist das BHKW-Aggregat, das sich aus dem Verbrennungsmotor und dem Generator mit den entsprechenden Kraftübertragungs- und Lagerungselementen zusammensetzt. Weitere wesentliche Bestandteile eines Moduls sind die Wärmeübertrager sowie Einrichtungen zur Steuerung, Regelung und Überwachung. Hinzu kommen Komponenten des Ansaug- und Abgassystems, der Kraftstoffzuführung, Anlasser und dergleichen /10-23/.

Die mechanische Energie des Motors wird im Generator in elektrische Energie umgewandelt. Die entstehende Abwärme aus den Kühlkreisläufen und dem Motorabgas wird über Wärmeübertrager und das Wärmeverteilungsnetz dem Verbraucher zugeführt.

Blockheizkraftwerke sind meist auf den Wärmebedarf ausgelegt und werden parallel zum elektrischen Netz betrieben. Daneben können sie auch stromgeführt zur völligen oder teilweisen Inselversorgung eingesetzt werden, wo sie andere Stromaggregate ersetzen oder ergänzen. Entscheidend für einen wirtschaftlichen Betrieb ist eine sorgfältige Einbeziehung der Wärmeverbraucher in das Gesamtsystem. Bei zu groß dimensionierten Anlagen führt eine unzureichende Wärmenutzung zu bedeutenden ökonomischen Einbußen.

Kraftstoffsystem. Der Kraftstoff wird für leistungsstärkere BHKW meist in größeren Lagerbehältern, die entweder unter- oder oberirdisch aufgestellt sind, bevorratet. Je nach den örtlichen Gegebenheiten kann auch eine Zwischenlagerung des benötigten Kraftstoffs in einem Tagestank in Aggregatsnähe erfolgen. Die Befüllung des Tagestanks wird dann automatisch über eine entsprechende Füllstandsregelung mit Pumpeinrichtung vorgenommen. Bei BHKW mit geringem Kraftstoffverbrauch dienen oft transportable Tankbehälter mit bis zu 1000 l Fassungsvermögen wechselweise zur Kraftstofflagerung und -versorgung.

Die Kraftstoffzuführung besteht im Wesentlichen aus Rohr- und Schlauchleitungen, Druckregelventilen, Kraftstoffvorfilter, Förderpumpe, Kraftstofffilter, Einspritzpumpe und Einspritzdüsen. Hier sind die spezifischen Anforderungen des Pflanzenöls an die Dimensionierung und an das Material der Komponenten zu berücksichtigen (Rohrleitungen und Verschraubungen aus chromatiertem Stahl oder besser Edelstahl, flexible Schlauchleitungen aus weichmacherarmem oder -freiem NBR-Kautschuk).

Motor. Für BHKW-Anwendungen stehen derzeit mehrere pflanzenöltaugliche Motortypen zur Verfü-

gung. Die Verbrennungsluft wird entweder von außen oder aus dem BHKW-Gebäude (gute Belüftung vorausgesetzt) dem Motor über einen Luftfilter zugeführt. Je nach Größe und Konzeption sind BHKW-Motoren entweder als Saugmotoren oder als aufgeladene Motoren mit Turbolader ausgeführt.

Kleinere BHKW mit einer Leistung bis zu etwa 25 kW_{el} werden meist mit umgerüsteten herkömmlichen Stationärdieselmotoren betrieben. Bewährt haben sich unter anderem 3- und 4-Zylinder-Vorkammermotoren der Hersteller Kubota und Farymann in einem Leistungsspektrum von ca. 8 bis 35 kW mechanische Leistung. Pflanzenölmotoren für mittlere und größere BHKW bis zu einer elektrischen Leistung von ca. 400 kW werden von den Firmen AAN Anlagen- und Antriebstechnik Nordhausen GmbH (früher: TMW) und Löschenkohl & Mitter Motorenwerk Schönebeck GmbH (früher: AMS bzw. DMS) in der Regel mit Direkteinspritzung z. T. auf Basis von MAN-Motoren angeboten. Eine Auswahl von Motorenherstellern und -umrüstern für Pflanzenöl-BHKW ist im Anhang E aufgelistet.

Emissionsminderung. Zur Minderung der Abgasemissionen können verschiedene Techniken oder Verfahren eingesetzt werden. Hierzu zählen die Abgasrückführung und Abgasreinigungssysteme wie Oxidationskatalysatoren, Entstickungskatalysatoren und Partikelabscheider (d. h. Rußfilter).

Bei der Abgasrückführung wird dem Abgas des Motors ein definierter Teilstrom entnommen und der Ansaugluft beigemischt. Dies führt zu einer Verminderung des Sauerstoffgehalts und niedrigeren Temperaturen im Brennraum, wodurch NO_x-Reduktionsraten zwischen 40 und 80 % erreicht werden können. Mit zunehmender Abgasrückführungsrate bewirkt jedoch der geringere Sauerstoffanteil bei der Verbrennung einen Anstieg der Rußemissionen.

Oxidationskatalysatoren setzen die Energieschwelle für die Einleitung von Oxidationsreaktionen herab und erhöhen gleichzeitig die Reaktionsgeschwindigkeit. Dem Beginn solcher Reaktionen geht die Anlagerung der oxidierbaren Stoffe wie CO und HC und des Sauerstoffs an der katalytisch aktiven Schicht voraus, an der die Molekülbindungen gelockert werden. Der optimale Arbeitsbereich für die bis zu mehr als 90 %-ige Umsetzung der CO- und HC-Emissionen liegt bei ca. 200 bis 350 °C.

Oxidationskatalysatoren eignen sich besonders gut für Pflanzenölmotoren, weil Pflanzenöl nahezu schwefelfrei ist und dadurch die katalytische Beschichtung der Katalysatoren nicht beeinträchtigt wird. Durch Oxidationskatalysatoren werden insbesondere auch Aldehyde, die für den pflanzenöltypischen Geruch verantwortlich sind, um über 80 % reduziert. Der Einsatz von Oxidationskatalysatoren ist daher für alle pflanzenölbetriebenen BHKW unbedingt zu fordern.

Mit Hilfe eines Entstickungskatalysators können Stickstoffoxide wirkungsvoll reduziert werden. Dabei wird vor dem Katalysator ein Reduktionsmittel (Ammoniak-, bzw. Harnstoff-Wasser, ggf. auch Kohlenwasserstoffe) in flüssigem oder gasförmigem Zustand dem Rauchgasstrom über ein Düsensystem zugeführt. Derartige „SCR-Katalysatoren“ werden bislang jedoch nur bei größeren Motoren (ca. >1000 kW_{FWL}) eingesetzt.

Mit Partikelfiltern lassen sich bei Selbstzündungsmotoren Partikel-Abscheideraten von 90 % und mehr erreichen. Insbesondere können auch die als stark gesundheitsgefährdend einzustufenden Feinstaubpartikel deutlich reduziert werden. Mit zunehmender Betriebszeit verringern die zurückgehaltenen Partikel den Filterquerschnitt und erhöhen den Abgasgegendruck. Damit der Filter nicht verstopft, ist von Zeit zu Zeit oder bei Erreichen eines bestimmten Abgasgegendrucks eine Regenerierung des Rußfilters notwendig. Bei Stationärmotoren erfolgt die Regeneration oft durch aktives Abbrennen des Rußes z. B. durch Eindüsung von Propangas in den Abgasstrom. Darüber hinaus sind im Rußfiltereinsatz abgelagerte nichtbrennbare Inertanteile des Abgasstroms von Zeit zu Zeit durch Waschen bzw. Ausblasen mit Druckluft zu entfernen.

Abgasleitung. Die Abgasableitung wird durch einen sogenannten Kompensator mit dem Abgasrohr des BHKW verbunden. Dadurch wird verhindert, dass Schwingungen übertragen werden und Temperaturschwankungen zu Materialschäden (z. B. Rissen an den Abgasrohren, Schalldämpfern und Wärmeübertragern) führen. Der Abgasstrom kann – sofern dies nach der jeweiligen Landesbauordnung und der Feuerungsverordnung (FeuV) zulässig ist – in einen bestehenden Kamin eingeleitet werden. Ansonsten ist eine möglichst isolierte Abgasableitung zur Vermeidung von Kondensatbildung entsprechend den Vorgaben der TA Luft bis über Firsthöhe vorzusehen. Werden Abgasrohre zur Abgasableitung verwendet, so sollten diese aus Edelstahl sein, um Korrosion zu verhindern. Eine Kondensatsammelstelle mit Ablassschraube zur Entfernung von Kondensat und eingedrungenem Regenwasser ist an der tiefsten Stelle des Abgasstrangs vorzusehen.

Generator und elektrische Einbindung. Die mechanische Energie des Motors wird im Generator zu Strom umgewandelt. Um ein BHKW unabhängig von einem Stromnetz z. B. als Notstromaggregat betreiben zu können, ist ein Synchrongenerator erforderlich. Eine Synchronisierungseinrichtung sorgt dafür, dass vor dem Aufschalten auf das Netz Spannung, Frequenz und Phase von Generator und Netz weitgehend übereinstimmen.

Im Gegensatz zu Synchrongeneratoren sind Asynchrongeneratoren meist robuster, wartungsärmer und im unteren Leistungsbereich auch kostengünstiger. Da Asynchrongeneratoren induktive Blindleistung aus dem Netz benötigen, sind sie nicht im Inselbetrieb einsetzbar.

Die elektrische Netzanbindung kann bis zu einer installierten elektrischen Leistung von ca. 1 MW an das vorhandene Niederspannungsnetz erfolgen. Bei größeren Anlagen wird meist in ein Mittelspannungsnetz eingespeist. Nur in seltenen Fällen ist eine eigene Leitung zum nächsten Netzknotenpunkt oder eine Trafostation notwendig, da die vorhandenen Kapazitäten in der Regel ausreichen. Die Bedingungen werden für den jeweiligen Fall von dem zuständigen Energieversorgungsunternehmen festgelegt.

Wärmeübertrager. Neben diskontinuierlich durchflossenen Wärmeübertragern (Regeneratoren) kommen bei BHKW vorwiegend kontinuierlich durchflossene Wärmeübertrager, sogenannte Rekupatoren, zum Einsatz. Rekupatoren unterscheiden sich nach ihrer Arbeitsweise in Gegenstrom-, Gleichstrom- und Kreuzstromwärmeübertrager. Je nach Anforderung werden verschiedene Bauarten wie Rohrbündel-, Platten-, Taschen- und Spiralrohrwärmeübertrager verwendet. Bei BHKW kann die Wärmeenergie der Ladeluft (bei aufgeladenen Motoren), des Generatorkühlwassers, des Motorkühlwassers, des Motorenöls oder des Motorabgases durch in Reihe geschaltete Wärmeübertrager ins Heizwasser übertragen werden. Daneben findet die Wärmeauskopplung auch manchmal in zwei getrennten Heizkreisen statt, um z. B. in einem Heizkreislauf ein höheres Temperaturniveau zu realisieren.

Betriebsbedingte Ablagerungen an den Wärmeübertragern (z. B. Ruß im Abgas-Wärmeübertrager, Kalk im Kühlwasser-Wärmeübertrager) erfordern von Zeit zu Zeit eine Reinigung der Wärmetauscherflächen, um einen ungehinderten Wärmeübergang zu gewährleisten. Bei manchen Abgaswärmeübertragern ist ein regelmäßiges Abkehren der Tauscherflächen mit einer Rußbürste (z. B. alle 1000 Betriebsstunden) erforderlich; es gibt aber auch selbstreinigende Systeme (z. B. Kugelregen- bzw. Kettenzugsysteme oder Dampfeinblasen), die zum Teil sogar kontinuierlich arbeiten (z. B. durch eine im Abgasstrom vibrierende Metallwendel. Der Reinigungsaufwand des nachgeschalteten Abgaswärmeübertragers kann deutlich gemindert sein wenn ein Rußfilter mit hohem Partikelabscheidegrad verwendet wird.

In den geschlossenen oder halboffenen Kühl- bzw. Heizwasserkreisläufen ist der Einsatz von korrosionshemmenden Inhibitoren erforderlich, da die gleichzeitige Anwesenheit von Stahl, Kupfer, Kupferlegierungen und Aluminium begünstigend auf die Korrosion wirkt. Bei diesen Zusätzen handelt es sich meist um kombinierte Frost- und Korrosionsschutzmittel. Die geforderte untere Konzentrationsgrenze im Wasser darf dabei nicht unterschritten werden, um die Wirksamkeit der Additive nicht zu gefährden. Anlagen, bei denen häufig Kühlwasser nachgefüllt werden muss, sind daher regelmäßig zu kontrollieren, um eine zu starke Verdünnung zu vermeiden. Die Frostschutzeigenschaften werden im Allgemeinen über eine Dichtemessung (Spindel) ermittelt, der Korrosionsschutz kann mit speziellen Testkits überprüft werden.

Um nach Abstellen des Motors einen Hitzestau am Aggregat zu vermeiden, ist ein Pumpennachlauf erforderlich, durch den überschüssige Wärme abgeführt wird. Gleiches gilt entsprechend für die Ventilatoren der Kabinenbelüftung.

Spitzenlastkessel. Wird neben dem BHKW noch ein Spitzenlastkessel betrieben, so ist darauf zu achten, dass der Wasserkreislauf des BHKW durch entsprechende Ventile geschützt ist, um bei Stillstand des Aggregats einen Wasserdurchfluss zu verhindern. Sonst könnte eine erhebliche Wärmemenge des Kesselheizwassers über die Wärmeübertrager an das BHKW abgegeben werden und verloren gehen. Außerdem führt dies zu einer unnötigen thermischen Belastung des Aggregats.

BHKW werden meist wärmegeführt betrieben und dienen zur Deckung des Grundwärmebedarfs. Zusätzlich installierte Spitzenlastkessel werden zugeschaltet, wenn die eingetauschte Motorabwärme nicht mehr die nötige Vorlauftemperatur im Heizkreislauf liefert. Um tageszeitliche Schwankungen zwischen Strom- und Wärmebedarfsspitzen ausgleichen zu können, wird ein Wärmespeicher eingesetzt. Aus diesem „Pufferspeicher“ heraus decken die Wärmeverbraucher ihren Wärmebedarf. Erst wenn die eingestellte Temperatur des Speichers nicht mehr mit dem

BHKW gedeckt werden kann, schaltet sich der Spitzenlastkessel zu. Die Auslegung des Wärmespeichers hängt von der thermischen Leistung des BHKW, vom Wärmebedarf und von der nutzbaren Temperaturdifferenz ab. Letztere wird vor allem durch die Rücklauftemperatur zum BHKW begrenzt. Damit eine ausreichende Motorkühlung in jedem Fall gewährleistet ist, liegt diese Rücklauftemperatur je nach Anlage bei maximal etwa 60 bis 70 °C.

10.3.3 Thermische Nutzung in Ölbrennern

Neben der kombinierten Kraft- und Wärmeerzeugung im Blockheizkraftwerk (BHKW) lässt sich naturbelassenes Pflanzenöl oder auch Pflanzenölmethylester (z. B. RME) auch als Brennstoff in Feuerungsanlagen einsetzen. Mit RME können in der Regel alle konventionellen Heizölfeuerungen betrieben werden, sofern diese RME beständig ausgeführt sind. Dagegen lässt sich naturbelassenes Rapsöl in modernen Heizölfeuerungsanlagen nur in Beimischungen von 10 bis 20 % zum Heizöl (extra leicht) verwenden, wobei es sich auch dann um eine Anlage mit Ölvorwärmung und „heißer Brennkammer“ handeln muss. In Anlagen, die diese Merkmale nicht aufweisen, können bereits bei einem Beimischungsanteil von 5 % Verkokungen an der Düse und der Stauscheibe auftreten /10-28/.

In jüngster Zeit werden von verschiedenen Herstellern auch rapsöltaugliche Ölbrenner für Zentralheizungskessel angeboten. Hierbei handelt es sich entweder um spezielle Brennerbauarten (z. B. Porenbrenner) oder um herkömmliche Heizölbrenner mit mehr oder weniger starken Modifikationen an der Ölzuführung bzw. mit zusätzlichen Komponenten zur Ölaufbereitung. Eine Liste der hierfür in Frage kommenden Hersteller findet sich im Anhang E.

Im Allgemeinen ist die Verwendung von Pflanzenölen als Ersatz für Heizöl in Ölbrennern nur in wenigen Ausnahmefällen sinnvoll, da hierfür biogene Festbrennstoffe (z. B. Scheitholz, Hackschnitzel) aus Kostengründen und wegen des höheren flächenbezogenen Energieertrags vorrangig einzusetzen sind. Lediglich wenn diese nicht verfügbar sind oder aus Boden- und Gewässerschutzgründen kein Heizöl verwendet werden soll (z. B. für Berghütten) kann ein alleiniger Heizzweck auch mit Pflanzenöl sinnvoll sein. Für die nachfolgenden Ausführungen ist er jedoch nicht relevant und wird daher nicht weiter betrachtet.

10.4 Planungs- und Betriebshinweise

Für die Planung und Auslegung von Pflanzenöl-BHKW gelten prinzipiell die gleichen Grundsätze, wie für Aggregate, die mit Heizöl oder Dieselkraftstoff betrieben werden. Diese Grundsätze werden in der VDI-Richtlinie 3985 „Grundsätze für Planung, Ausführung und Abnahme von Kraft-Wärme-Kopplung mit Verbrennungskraftmaschinen“ beschrieben /10-23/. Lediglich bei der Wirtschaftlichkeitsrechnung sind hinsichtlich Investitions- und Brennstoffkosten sowie bei den erzielbaren Erlösen der Stromeinspeisung abweichende Annahmen gegenüber Dieselaggregaten zu treffen. Diese werden in Kapitel 10.7 näher erläutert.

Die einzelnen Aufgaben der Planung lassen sich wie folgt auflisten:

- Durchführung einer Voruntersuchung, Bedarfsanalyse und Bestandsaufnahme
- Erstellung von BHKW-Konzepten (Modulvorauswahl, Betriebsweise)
- Überprüfung der Wirtschaftlichkeit der Konzepte
- Vorplanung und Entwurfsplanung auf Grundlage einer Vorentscheidung
- ggf. das Führen von Vorgesprächen mit der Genehmigungsbehörde (Kreisverwaltungsbehörde)
- Ausführungsplanung und Erstellung von Ausschreibungsunterlagen sowie Leistungsverzeichnissen
- ggf. die Einholung eines immissionsschutztechnischen Gutachtens

Hinweise und Grundlagen für eine solche Planungsphase werden in den nachfolgenden Kapiteln gegeben.

Auslegung. Ob ein BHKW wirtschaftlich betrieben werden kann, hängt entscheidend von der gewählten Leistung ab. Bei Aggregaten, die nicht vorwiegend zur netzunabhängigen Stromversorgung eingesetzt werden, sollte die Auslegung so erfolgen, dass die anfallende Wärme in großem Umfang genutzt werden kann. Grundlage für die Auslegung bildet somit eine Analyse eines Jahresverlaufs des Wärmeleistungsbedarfs. In einer geordneten thermischen „Jahresdauerlinie“, wie sie in Kapitel 6.2.2 beispielhaft dargestellt ist, wird aufgetragen, wie viele Stunden pro Jahr eine bestimmte thermische Leistung (in kW) benötigt wird. Als Richtgröße sollte die thermische Gesamtleistung des BHKW im Allgemeinen bei etwa 30 % der notwendigen thermischen Maximalleistung liegen. So wird sichergestellt, dass durch das BHKW etwa 60 bis 80 % des Jahreswärmebedarfs bei 4 000 bis 6 000 Jah-

resstunden abgedeckt sind /10-6/. Zusätzlich zu erfassende Tagesganglinien des Strom- und Wärmeleistungsbedarfs geben Aufschluss darüber, inwieweit diese beiden Bedarfsfälle zeitlich übereinstimmen.

Betriebsweise. BHKW werden entweder wärmegeführt, stromgeführt oder in einer Kombination beider Möglichkeiten betrieben.

Ein wärmegeführtes BHKW wird nach dem Wärmebedarf der Verbraucher ausgelegt. Zusätzliche Wärmeerzeuger können das Aggregat bei der Deckung des momentanen Wärmebedarfs unterstützen. Der produzierte elektrische Strom wird ganz oder teilweise (abzüglich des Eigenverbrauchs) in das Stromnetz eingespeist.

Stromgeführte BHKW arbeiten entweder im Netzparallelbetrieb, d. h. sie decken den eigenen Strombedarf – z. T. unterstützt durch das öffentliche Netz – ab, oder im Inselbetrieb, in dem sie den Leistungsbedarf der Verbraucher allein abdecken. Auch beim stromgeführten Betrieb sollte ein möglichst großer Teil der anfallenden Wärme genutzt werden. Mit entsprechenden Wärmespeichern können zeitliche Verschiebungen von Strom- und Wärmebedarf zumindest teilweise ausgeglichen werden.

Bei einer kombinierten Betriebsweise wird das Aggregat z. B. wärmegeführt betrieben und zusätzlich zur Spitzenstromabdeckung eingesetzt. Die Wahl der Betriebsweise erfolgt in erster Linie nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten.

Kraftstoffbeschaffung. Naturbelassenes Rapsöl kann direkt von den Ölproduzenten (Ölmühlen oder Kleinerzeuger), Großhändlern, Landhändlern oder auch direkt von speziellen Pflanzenöltankstellen bezogen werden. Aktuelle Verzeichnisse von Bezugsquellen sind im Internet zu finden; entsprechende Web-Adressen werden im Anhang E zusammengestellt. Um die Versorgungssicherheit zu gewährleisten, ist bei kleineren z. B. regionalen Anbietern oft der Abschluss längerfristiger Lieferverträge sinnvoll.

Die Anlieferung erfolgt bei kleineren Mengen häufig in Kunststoff- oder Stahlblechbehältern auf Paletten mit ca. 800 bis 1000 l Inhalt. Diese können dann auch als Lagerbehälter beim BHKW-Betreiber dienen. Bei größeren BHKW mit hohem Kraftstoffverbrauch und guter Auslastung ist es sinnvoll, einen Kraftstofftank mit entsprechenden Befüll- und Entleerungseinrichtungen sowie Druckausgleichsventilen und Füllstandsanzeige zu installieren. Zur Anlieferung des Pflanzenöls werden dann meist Tanklastzüge eingesetzt. Dabei ist es wichtig, dass die Ladebehälter sauber und frei von Restmengen zuvor transportierter Güter sind. Derartige Rückstände können zum Teil zu erheblichen Schäden und Störungen führen (Filterverstopfungen, Reinigung und Austausch des gesamten Kraftstoffsystems, etc.).

Qualitätssicherung beim Kraftstoff. Bei den Pflanzenölkraftstoffen für BHKW liegen die mit Abstand umfangreichsten Einsatzerfahrungen mit Rapsöl vor. Hierfür ist auch die Standardisierung, d. h. die Festschreibung von Mindest-Qualitätsanforderungen, am weitesten fortgeschritten (siehe Qualitätsstandard für Rapsöl als Kraftstoff, Kapitel 10.2). Das Rapsöl sollte entweder aus einer kalten Pressung stammen oder als raffiniertes Öl verwendet werden. Dadurch werden Betriebsstörungen, z. B. durch die Bildung von Ablagerungen in Brennraum, vorgebeugt. Rapsöl ist außerdem lagerstabiler als viele andere Öle und daher besonders empfehlenswert. Die Verwendung von nicht näher spezifiziertem Pflanzenöl (z. B. Ölgemische aus Großküchen) oder Teilraffinaten sollte vermieden werden. Öle unbekannter Herkunft sind nur nach vollständiger Analyse und bei Einhaltung der Qualitätsanforderungen geeignet.

Ein Mischen des Pflanzenöls mit Heizöl oder Dieselkraftstoff (z. B. beim Zwischentanken) sollte vermieden werden, da dadurch die Lagerungsstabilität der Mischung stark beeinträchtigt werden kann. Bei Zumischung schwefelhaltiger Kraftstoffe kommt es außerdem im Abgaskatalysator zur ungewollten Oxidation von SO_2 zu SO_3 sowie zur Bildung weiterer Schwefelverbindungen, die dessen Wirksamkeit beeinträchtigen. Zugemischte mineralische Kraftstoffe können auch eventuell festgesetzte Pflanzenöl-Rückstände in Tanks und Leitungen lösen, die dann die Kraftstoffversorgung des Aggregats durch Verstopfen von Filter und Leitungen beeinträchtigen.

Eine erste Qualitätsbeurteilung durch Sicht- und Geruchskontrolle einer repräsentativen Ölprobe sollte mindestens bei jedem Betankungsvorgang erfolgen. Frisches Rapsöl ist durchsichtig klar, hat eine goldgelbe Farbe und riecht leicht nussartig. Bei einer Sichtkontrolle ist insbesondere auf feste Fremdstoffe im Öl, auf Trübungen, Verfärbungen (vor allem grünliche Verfärbungen), Phasentrennungen (z. B. durch freies Wasser) zu achten. Beim Geruchstest sollten keine stechenden Gerüche (z. B. durch Verunreinigung mit mineralischen Kraftstoffen oder Lösungsmittelrückständen) oder ranzige Gerüche (z. B. durch stark oxidativ vorbelastete Öle) festgestellt werden. Zur schnellen Abschätzung, ob die im RK-Qualitätsstandard geforderten Grenzwerte eingehalten werden,

sind Schnelltests für die Kenngrößen: Wassergehalt, Neutralisationszahl und Gesamtverschmutzung verfügbar (Bezugsquelle: /10-1/). Diese Schnelltests ersetzen aber nicht eine Ölanalyse entsprechend der vorgeschriebenen Prüfmethoden /10-16/. Im Verdachts- oder Schadensfall sollte eine solche Analyse durchgeführt werden.

Kraftstofflagerung. Pflanzenöle sind im Gegensatz zu Heizöl und Dieselkraftstoff nicht additiviert und sind daher auch stärker Alterungsvorgängen ausgesetzt (oxidativer Verderb, Bildung freier Fettsäuren). Die Oxidationsvorgänge von Ölen und Fetten werden begünstigt durch Sauerstoffzutritt, Licht und Wärme und durch katalytisch wirkende Schwermetallionen (z. B. Eisen, Kupfer). Negative Auswirkungen auf die Eignung als Kraftstoff (z. B. erhöhte Viskosität, verstärkte korrosive Wirkung) sind die Folge. Bei der motorischen Nutzung kann es außerdem zu Rückstandsbildungen in Kraftstoffleitungen, Verharzungen an den Einspritzdüsen und zur Beeinträchtigung der Schmierfähigkeit des Motorenöls kommen.

Für die Lagerung gelten folgende Empfehlungen:

- möglichst konstant niedrige Lagerungstemperaturen (ca. 5 bis 10 °C), am besten durch Erdtanks oder zumindest durch kühle Tankaufstellung (Keller)
- keine Tankheizungen verwenden (Die Verbesserung der Fließ- und Pumpfähigkeit sollte statt dessen durch vergrößerte Querschnitte der Kraftstoffleitungen oder leistungsstärkere Förderpumpen erreicht werden; bei evtl. dennoch benötigter Tankheizung sollte das Öl – auch lokal – keinesfalls über 25 °C aufgeheizt werden.)
- dunkler Aufstellungsort ohne direkte Sonneneinstrahlung
- Zutritt von Sauerstoff gering halten (Auch bei Tank- und Pumpvorgängen sollte ein „Plätschern" durch geringe Fallhöhen oder durch „Abfließen-lassen" an den Tankinnenwänden vermieden werden, eine Entlüftungseinrichtung zur Vermeidung von Druckschwankungen beim Befüllen und Entleeren ist jedoch immer erforderlich.)
- Eintrag von Wasser vermeiden (z. B. Kondenswasserbildung bei Befüllung eines kalten Tanks mit warmen Pflanzenöl)
- Eintrag von Verschmutzungen ausschließen
- Tank und kraftstoffführende Teile dürfen nicht aus Kupfer oder Messing sein (vor allem Kupferionen wirken stark katalytisch auf die Öloxidation)
- Kraftstoffentnahmestelle nicht unmittelbar am Tankboden anbringen (Sedimententnahme vermeiden)
- Lagertanks sollen vollständig und einfach entleerbar sowie leicht zu reinigen sein (eine regelmäßige Tankreinigung ca. alle 1- bis 3 Jahre ist empfehlenswert).
- Maximale Lagerdauer: ca. 12 Monate (keine überdimensionierten Lagertanks)

Als ortsfeste ober- und unterirdische Lagerbehälter ab einem Fassungsvermögen von etwa 1000 l eignen sich vor allem ein- und doppelwandige Stahl- oder Kunststoffbehälter mit Füll- und Entlüftungsleitungen, sowie Leckanzeigegeräten, Füllstandsanzeiger und Befüllsicherungseinrichtungen. Bestehende intakte Tankanlagen, die zur Lagerung von Heizöl benutzt werden, können nach vollständiger Entleerung und Reinigung auch für Pflanzenöl verwendet werden, sofern die oben genannten Punkte berücksichtigt werden.

Kraftstoffzuführung. Prinzipiell gelten die für die Lagerung von Pflanzenöl aufgeführten Empfehlungen entsprechend auch für die Kraftstoffzuführung. Im Einzelnen sind zu nennen:

- Kraftstoffführende Leitungen und Verschraubungen sollten nicht aus Kupfer oder Messing beschaffen sein (besser: chromatierter Stahl oder Edelstahl)
- flexible Schlauchleitungen aus pflanzenölbeständigem Material, wie z. B. Nitril-Kautschuk – NBR (Perbunan) oder Fluor-Kautschuk – FPM (Viton) verwenden
- Rohrleitungsquerschnitte ausreichend dimensionieren (zähflüssiger Kraftstoff!); beispielsweise bei kleineren BHKW mit Innendurchmesser von ca. 10 bis 12 mm (für Kraftstoffdurchflüsse bis ca. 30 l/h)
- Probenahmevorrichtung (Entnahmehahn in Kraftstoffzulaufleitung) und Schauglas zur Kontrolle vorsehen
- leistungsstarke und leicht zugängliche Kraftstoffförderpumpe verwenden (konventionelle Kraftstoffförderpumpen sind oft nicht ausreichend, daher sollte eine aggregat-externe Elektro-Förderpumpe nahe dem Kraftstoffvorratsbehälter angebracht sein; das Fördervolumen sollte ca. 50 bis 100 % über dem maximalen Kraftstoffverbrauch des BHKW liegen.)
- kurze Leitungsführung und geringe Saughöhe vorsehen
- Leitungen nicht unter Putz oder im Boden verlegen
- Leitungsverbindung zum BHKW flexibel und schwingungstolerant ausführen
- Kurzschlusskreislauf von Kraftstoffrücklauf- und Leckkraftstoffleitung zum Vorlauf (Einstrangsystem) einrichten (zur Vermeidung von Rückflüssen

des thermisch vorbelasteten Pflanzenöls in den Tank)
- Verwendung von Filtereinrichtungen (Feinfilter), bei größerem Schmutzanfall auch zusätzlich gröbere Vorfilter (meist Siebfilter). Die Verwendung von Motorenölfiltern als Kraftstofffilter ist möglich und oft sinnvoll (bessere Eignung wegen hoher Viskosität des Pflanzenöls), sofern eine ausreichende Filterleistung gewährleistet ist. Die notwendige mittlere Filterfeinheit beträgt für Reiheneinspritzpumpen etwa 5 µm und für Verteilereinspritzpumpen etwa 10 µm /10-14/. Zur Minimierung von Standzeiten sind parallelgeschaltete Kraftstoffbypassfilter empfehlenswert.
- auf Kraftstoffvorwärmung zur Vermeidung von Verharzungen möglichst verzichten (außer bei sehr kurzer Förderdauer bis zur Einspritzung, jedoch nicht im Tank und bei Motorstillstand)
- nur geeignete hoch belastbare Einspritzpumpe verwenden (stärkere Belastungen als bei Dieselbetrieb)
- Vermeidung von Verkokungen und Ablagerungen an den Einspritzdüsen u. a. durch gute Kraftstoffqualität mit niedrigem Koksrückstand (vgl. Kapitel 10.2) aber auch durch eine geeignete Düsengeometrie, die einer Rückstandsbildung vorbeugt. Ablagerungen behindern das Schließen der Düsennadel und beeinträchtigen die Zerstäubungsqualität, so dass es zum Nachtröpfeln verbunden mit erhöhten HC- und Rußemissionen kommt; unverbrannter Kraftstoff gelangt außerdem an die Zylinderwände und kann auf diese Weise in das Motoröl eingetragen werden, was unter bestimmten Bedingungen zu dessen Eindickung und zum Ausfall der Schmierfähigkeit (Motorschaden) führt.

Motor. Neben fremdstoffbeladenen Pflanzenölen zählen Schmieröleindickung und Motorüberhitzung zu den wichtigsten Ursachen für Schäden an Pflanzenölmotoren. Der Wahl des geeigneten Kraftstoffs (z. B. nach RK-Qualitätsstandard, vgl. Kapitel 10.2) und des Motors kommt deshalb eine hohe Bedeutung bei. Hitzeschäden werden durch eine ausreichende Wärmeabfuhr durch eine leistungsfähige Belüftung des Motors und saubere Wärmetauscherflächen sichergestellt. Überschüssige Wärme ist auch nach Abstellen des Aggregats durch entsprechende Nachlaufzeiten von Wasserpumpen und Lüftern abzutransportieren.

Unbedingt einzuhalten sind die vorgegebenen Wartungsintervalle. Eine hohe Bedeutung kommt dem Wechsel des Motoröls zu, da dieses z. B. infolge häufigerer Kaltstarts oder bei fehlerhaften bzw. verkokten Einspritzdüsen mit Pflanzenöl verunreinigt sein kann (auf Grund der höheren Verdampfungstemperatur von Pflanzenöl erfolgt oft kein Absinken des Schmierölpegels im Motor). Mit Pflanzenöl verunreinigtes Motoröl kann durch Verharzungen und Eindickungen die Motorschmierung beeinträchtigen.

Aufstellort. Im Aufstellungsraum des BHKW ist für eine ausreichende Verbrennungsluftversorgung und Abgasabführung zu sorgen. Die dafür geltenden Richtlinien sind in den Feuerungsverordnungen der Länder bzw. der TA Luft aufgeführt (Kapitel 10.5). Schallschutzmaßnahmen sind bei der Aufstellung ebenso zu berücksichtigen wie Maßnahmen zur Vibrations- und Schwingungsdämpfung. Das Aggregat sollte rutschfest auf tragfähigem Boden stehen. Neben einer ausreichenden Raumbelüftung ist auch für die Abfuhr der durch die Motorabwärme aufgeheizten Kabinenluft zu sorgen, um ein Überhitzen des Motors und/oder des Aufstellungsraums zu vermeiden. Bei Bedarf kann diese Warmluft zur Raumbeheizung dienen. Des Weiteren ist eine möglichst allseitige gute Zugänglichkeit des Aggregats für Wartungs- und Reparaturmaßnahmen sicherzustellen.

Wartung und Überwachung. Der vom Anlagenbauer vorgegebene Wartungsplan ist unbedingt einzuhalten. Abweichungen davon sollten mit dem Motorenhersteller oder Anlagenbauer abgestimmt werden.

Kleinere und häufig wiederkehrende Wartungsarbeiten wie z. B. Kraftstofffilterwechsel und Motoröl- bzw. Filterwechsel können üblicherweise von einem ortsansässigen Kundendienst nach entsprechender Einweisung durchgeführt werden. Motoröl- und Kraftstofffilter sind je nach Aggregat etwa alle 300 bis 600 Betriebsstunden, d. h. bei gut ausgelasteten BHKW ca. alle 2 bis 4 Wochen, zu wechseln. Inspektionen – vor allem innerhalb der Garantiezeit von meist einem Jahr oder einer bestimmten Betriebsstundenzahl – sollten dem Anlagenbauer oder einem von ihm beauftragten Fachkundendienst überlassen werden.

Neben den üblichen Wartungsintervallen sollten regelmäßige, am besten tägliche, Routinekontrollen am BHKW von einer eingewiesenen fachkundigen Person stattfinden. Hierbei ist vor allem die Dichtigkeit von kraftstoff-, öl-, wasser- und gasführenden Komponenten zu überprüfen, regelmäßig der Motoröl- und Kühlwasserstand zu kontrollieren, ebenso sind die an der Anlage installierten Mess- und Überwachungseinrichtungen abzulesen. Zusätzlich sollte auf unübliche Geräusche, eine abweichende Abgasfahne (bei Rußschwärzung ggf. Einspritzsystem warten), den Festsitz aller Bauteile und einen ausreichenden Kraftstoff- und

Motorölvorrat geachtet werden. Das Führen eines Anlagenbuches ist empfehlenswert. Darin werden wichtige Daten wie der Betriebsstundenzählerstand, Zustand des Aggregats, angezeigte Fehlermeldungen, eventuell beobachtete Auffälligkeiten sowie durchgeführte Instandhaltungsmaßnahmen (z. B. letzter Einspritzdüsenwechsel) und weitere Ereignisse (z. B. Kraftstofflieferung) mit Datum und Namen des Beobachters oder Ausführenden festgehalten. Auch Betriebsdaten wie Motor- und Abgastemperatur werden darin notiert. Dadurch wird eine frühere Erkennung von Störungen und deren Ursachen ermöglicht und der Nachweis über die ordnungsgemäße Durchführung der Wartungsarbeiten erbracht.

10.5 Anforderungen und Vorschriften

Nachfolgend werden die relevanten rechtlichen Rahmenbedingungen für den Einsatz von pflanzenölbetriebnen BHKW vorgestellt. Diese Rahmenbedingungen unterliegen – bedingt durch die fortschreitende nationale und europäische Gesetzgebung – fortlaufenden Änderungen, es ist deshalb empfehlenswert sich über die jeweils gültige aktuelle Gesetzeslage zu informieren.

10.5.1 Genehmigung

Blockheizkraftwerke benötigen entweder eine baurechtliche Genehmigung nach dem Baugesetzbuch (BauGB) sowie der jeweiligen Landesbauordnung (z. B. BayBO) oder eine immissionsschutzrechtliche Genehmigung nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG).

Baurechtliche Genehmigung. Blockheizkraftwerke sind Anlagen, die zur Raumbeheizung oder zur Brauchwassererwärmung dienen und fallen demnach in den Anwendungsbereich der jeweiligen Landesbauordnung. Zudem fallen Blockheizkraftwerke in den Geltungsbereich der Verordnung über Feuerungsanlagen, Wärme- und Brennstoffversorgungsanlagen (Feuerungsverordnung – FeuV), in denen ebenfalls länderweise zum Teil unterschiedliche Regelungen festgelegt wurden.

Unter bestimmten Bedingungen sind die Anlagen jedoch von der Genehmigungspflicht befreit. Nach der Bayerischen Landesbauordnung (Art. 63 BayBO) gilt dies beispielsweise, wenn es sich um die Errichtung oder Änderung einer Feuerstätte mit einer Nennwärmeleistung bis zu 50 kW handelt.

Die generellen Forderungen einer Landesbauordnung lassen sich für BHKW wie folgt zusammenstellen (hier am Beispiel der Bayerischen Bauordnung /10-1/):

- Die Aufstellung sollte nur in Räumen erfolgen, bei denen nach Lage, Größe, baulicher Beschaffenheit und Benutzungsart Gefahren nicht entstehen.
- Abgase sind so ins Freie zu führen, dass Gefahren oder unzumutbare Belästigungen nicht entstehen.
- Brennstoffe sind so zu lagern, dass Gefahren oder unzumutbare Belästigungen nicht entstehen.
- Für Schall-, Schwingungs- und Erschütterungsschutz ist zu sorgen, so dass keine Gefahren, vermeidbare Nachteile oder vermeidbare Belästigungen entstehen.

Neben der Landesbauordnung sind die Bestimmungen der jeweiligen Länder-Feuerungsanlagenverordnung (FeuV) zu beachten, z. B.:

- Eine Aufstellung in Räumen mit Anlagen zur Luftabsaugung darf nur erfolgen, wenn die Abgasabführung durch entsprechende Maßnahmen überwacht bzw. sichergestellt wird.
- Bauteile mit brennbaren Baustoffen und Einbaumöbel müssen so weit von der Feuerstätte (BHKW) entfernt oder so abgeschirmt sein, dass keine höheren Temperaturen als 85 °C auftreten können.
- Für eine ausreichende Verbrennungsluftversorgung im Aufstellraum ist zu sorgen.
- Die Verbrennungsabgase sind über eigene dichte Leitungen über Dach abzuführen.
- Abgasanlagen sind so zu bemessen, dass die Abgase sicher ins Freie abgeführt werden und bestimmte Mindestabstände zu brennbaren Baustoffen eingehalten werden.

Immissionsschutzrechtliche Genehmigung. Eine Genehmigung nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) ist bei BHKW für den Einsatz von naturbelassenem Pflanzenöl erst ab 1000 kW Feuerungswärmeleistung (entspricht ca. 400 kW_{mech}) erforderlich (Nr.1.4, Spalte 2 des Anhangs zur 4. BImSchV, Fassung vom 20.04.98). Einzelheiten zum Genehmigungsverfahren sollen daher hier nicht erörtert werden.

Generell gelten aber auch bei nicht genehmigungsbedürftigen Anlagen (d. h. lediglich baurechtlich zu genehmigende Anlagen) die Minimierungsgrundsätze des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (§22, BImSchG). Demnach müssen

- schädliche Umwelteinwirkungen, die nach dem Stand der Technik vermeidbar sind, verhindert werden,

- nach dem Stand der Technik unvermeidbare schädliche Umwelteinwirkungen auf ein Mindestmaß beschränkt werden und
- die beim Betrieb der Anlagen entstehenden Abfälle ordnungsgemäß beseitigt werden können.

10.5.2 Emissionsbegrenzungen

Schadstoffemissionen. Für immissionsschutzrechtlich nicht genehmigungspflichtige Anlagen mit einer Feuerungswärmeleistung von weniger als 1000 kW wurden bislang keine allgemeingültigen Vorschriften zur Emissionsbegrenzung festgelegt, und es finden auch keine regelmäßigen Überprüfungen statt. Allerdings werden einige Orientierungswerte genannt, die für die Beurteilung der jeweiligen Anlage nützlich sein können (Tabelle 10.3).

Tabelle 10.3: Empfohlene Emissionsbegrenzungen (derzeitige Orientierungswerte) für immissionsschutzrechtlich nicht genehmigungsbedürftige Anlagen (d. h. Gesamtfeuerungswärmeleistung, FWL < 1 MW) /10-29/

Schadstoff	FWL	Anforderung[a]
Kohlenmonoxid (CO)	< 1 MW	≤ 0,65 g/Nm³
Staub	< 1MW	Zielwert: 20 mg/Nm³ durch Einsatz von Rußfiltern unter Beachtung des Grundsatzes der Verhältnismäßigkeit
Stickstoffoxide (NO_x), angegeben als NO_2	≥ 500 kW bis 1 MW	≤ 2,5 g/Nm³ (durch motorische Maßnahmen analog EURO II)
	< 500 kW	≤ 3,0 g/Nm³ (Zielwert 2,5 g/Nm³, durch motorische Maßnahmen analog EURO II)
Gerüche/HC	< 1 MW	Einsatz von Oxidationskatalysatoren

a. angegeben in Milligramm pro Normkubikmeter (mg/Nm³), bezogen auf einen Sauerstoffgehalt von 5 Vol.-%

Anforderung an Lärm- und Erschütterungsschutz. Um Lärmbelästigungen für die Nachbarschaft auszuschließen, sind die Forderungen der technischen Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm /10-17/) zu erfüllen. Zur Beurteilung des für die Nachbarschaft zumutbaren Lärms wurden darin Immissionsrichtwerte festgelegt. Diese betragen für Orte außerhalb von Gebäuden:

- in Industriegebieten: 70 dB
- in Gewerbegebieten: tags 65 dB, nachts 50 dB
- in Kern-, Dorf- und Mischgebieten: tags 60 dB, nachts 45 dB
- in allgemeinen Wohngebieten und Kleinsiedlungsgebieten: tags 55 dB, nachts 40 dB
- in reinen Wohngebieten: tags 50 dB, nachts 35 dB
- in Kurgebieten, für Krankenhäuser und Pflegeanstalten: tags 45 dB, nachts 35 dB

Als Maßnahmen zur Verringerung der Lärmemissionen werden BHKW schwingungsisoliert aufgestellt und mit einer Schallschutzkapselung umgeben. Bei relativ geringem Abstand zur Wohnbebauung ist meist die Erstellung eines Schallschutzgutachtens erforderlich. Darin sollten nicht nur der sogenannte „A-bewertete Beurteilungspegel“ (Die A-Bewertung bildet näherungsweise die frequenzabhängige Empfindlichkeit des menschlichen Gehörs nach.) ermittelt werden, sondern auch die tieffrequenten Geräuschanteile der Motoren gemäß TA Lärm untersucht bzw. beurteilt werden.

10.5.3 Vermeidung von Gefährdungen

Die von Kraftstoffen ausgehende Gefährdung betrifft einerseits die Brand- bzw. Explosionsgefahr und andererseits die Gefährdung des Grundwassers und die Gewässergefährdung.

Wasserrechtliche Einordnung. Entsprechend ihrer Gefährlichkeit werden Chemikalien nach dem Wasserhaushaltsgesetz (WHG) gemäß §19g, Abs. 5 in Verbindung mit der Verwaltungsvorschrift wassergefährdender Stoffe (VwVwS) in eine von drei Wassergefährdungsklassen (WGK) eingestuft. Die Stoffe gelten entweder als „stark wassergefährdend“ (WGK 3), „wassergefährdend“ (WGK 2) oder als „schwach wassergefährdend“ (WGK 1) /10-3/.

Reines unbehandeltes Rapsöl wurde von der Kommission Bewertung wassergefährdender Stoffe (KBwS) auf Grund seiner Abbaubarkeit und seiner geringen aquatischen Toxizität als „nicht wassergefährdend“ eingestuft (Neufassung der VwVwS vom 17. Mai 1999). Das bedeutet, dass keine der oben genannten Gefährdungsklassen zutrifft. Ein Zusatz von Additiven kann jedoch die Einstufung in eine der drei genannten Wassergefährdungsklassen zur Folge haben.

Bei dieser günstigen Einordnung von naturbelassenem Rapsöl handelt es sich jedoch nicht um eine bindende Vorschrift. Im Einzelfall sind daher abweichende Beurteilungen möglich, so dass weitere Bestimmungen des Wasserhaushaltsgesetzes für was-

sergefährdende Stoffe (z. B. bei Lagerung und Umschlag) beachtet werden müssen.

Brand- und Explosionsschutz. Naturbelassenes Rapsöl weist mit durchschnittlich ca. 231 °C /10-16/ einen deutlich höheren Flammpunkt auf, als mineralischer Dieselkraftstoff (ca. 64 °C) oder Benzin (unter -20 °C). Es ist somit vergleichbar mit Rapsölmethylester (ca. 172 °C) /10-10/. Beide Kraftstoffe unterliegen nicht der Verordnung über brennbare Flüssigkeiten (VbF), wonach eine Einstufung als Gefahrgut erst bei einem Flammpunkt von weniger als 100 °C gegeben wäre /10-26/. Für den Transport von Pflanzenöl bestehen somit keine Sondervorschriften. Auch die Gefahrgutverordnung Straße (GGVS), die die innerstaatliche und grenzüberschreitende Beförderung gefährlicher Güter regelt, findet keine Anwendung. Spezielle Anforderungen an Fahrzeug und Fahrer sowie das Mitführen von Begleitpapieren sind beim Transport von Rapsölkraftstoff nach RK-Qualitätsstandard (Kapitel 10.2) nicht notwendig.

Werden andere Kraftstoffe mit Rapsöl gemischt, kann sich diese günstige Einstufung rasch ändern. Schon eine 10-%ige Dieselbeimischung senkt den Flammpunkt unter den genannten Grenzwert von 100 °C, bei Benzin genügt sogar ein Beimischungsanteil von weniger als 1 % /10-16/.

10.5.4 Steuerliche Regelungen

Mineralölsteuer. Rapsöl ist gemäß §1 des Mineralölsteuergesetzes (MinöStG) nicht als Mineralöl einzuordnen und ebenso wie Fettsäuremethylester von der Mineralölsteuer befreit /10-13/. Die Befreiung gilt bisher nur, wenn keine Mischung mit mineralölsteuerpflichtigen Komponenten vorgenommen wird. Bereits die Beimischung kleiner Mengen von Mineralöl zu Rapsöl (z. B. Zugabe von Dieselkraftstoff zur Erhöhung der Kältestabilität von Rapsöl im Winter) führt dazu, dass aus dem gesamten Mischkraftstoff ein neues voll mineralölsteuerpflichtiges Erzeugnis wird. Lediglich ein Anteil von höchstens etwa 3 % mineralischem Kraftstoff im Pflanzenöl, der sich auf Grund von Vermischung mit Restmengen in Tanks oder Tanklastzügen ergeben kann, ist steuerlich unbedenklich.

Eine Ausnahme wird in §2 der Mineralölsteuer-Durchführungsverordnung (MinöStV) /10-27/ formuliert. Demnach ist das Mischen von „Mineralölen mit Kraftstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen, die kein Mineralöl im Sinne des Gesetzes sind, beim Befüllen von Hauptbehältern von Beförderungsmitteln, Spezialcontainern, Arbeitsmaschinen und -geräten, land- und forstwirtschaftlichen Fahrzeugen sowie Kühl- und Klimaanlagen", nicht mineralölsteuerpflichtig. Dies gilt jedoch nicht für BHKW.

Wird Gasöl (d. h. Kohlenwasserstoff-Mitteldestillate, wie Dieselkraftstoff/Leichtes Heizöl mit einem verdampften Anteil von mindestens 85 Vol-% bei 350 °C) zum unmittelbaren Heizen verwendet, ermäßigt sich der Steuersatz nach §3 Abs. 2 MinöStG /10-13/. Heizöl darf auch in ortsfesten Anlagen verwendet werden, wenn die Anlage ausschließlich der gekoppelten Erzeugung von Wärme und Kraft (Kraft-Wärme-Kopplung) dient. Blockheizkraftwerke gelten auch dann als ortsfest „wenn sie zur Erzielung einer höheren Auslastung für die abwechselnde Nutzung an nicht mehr als zwei Standorten ausgelegt sind" /10-7/. Entsprechend §3 Abs. 2 MinöStG /10-13/ unterliegen auch Mischkraftstoffe dem ermäßigten Steuersatz, wenn die Anlage ausschließlich der gekoppelten Erzeugung von Wärme und Kraft dient. Beim Einsatz in nicht ortsfesten Anlagen unterliegen dagegen Kraftstoffmischungen aus Pflanzenöl und Mineralöl dem Regelsteuersatz. Nach Inkrafttreten des im Juni 2002 von der Bundesregierung beschlossenem „Gesetz zur Änderung des Mineralölsteuergesetzes und anderer Gesetze" können zukünftig auch ortsfeste Notstromaggregate mit Heizöl betrieben werden.

Durch die Gesetze zum Einstieg bzw. zur Fortführung der Ökologischen Steuerreform /10-7/, /10-8/ wurde das Mineralölsteuergesetz in wichtigen Punkten geändert. Demnach werden nun Kraftwerke mit Kraft-Wärme-Koppelung mit einem Jahres- bzw. Monatsnutzungsgrad ab 70 % von der bestehenden Mineralölsteuer vollständig ausgenommen.

Die Bundesregierung hat im Juni 2002 im „Gesetz zur Änderung des Mineralölsteuergesetzes und anderer Gesetze" eine Steuerbegünstigung für Biokraftstoffe beschlossen. Demnach sind die Steuersätze nach §2 Abs. 1 und §3 Abs. 1 des Mineralölsteuergesetzes bis zum 31. Dezember 2008 in dem Umfang ermäßigt, in dem die dort genannten Mineralöle nachweislich Biokraftstoffe enthalten. Reiner Rapsölkraftstoff wird in Deutschland also voraussichtlich auch bis auf Weiteres vollständig von der Mineralölsteuer befreit sein. Bei Mischungen wird die Mineralölsteuer zukünftig voraussichtlich nur auf den Mineralölanteil der Mischung erhoben werden. Dieses Gesetz tritt erst nach Ermächtigung durch den Rat der Europäischen Union jedoch nicht vor dem 1. Januar 2003 in Kraft. Die nationalen Durchführungsbestimmungen müssen dann noch erarbeitet werden.

Auch auf europäischer Ebene wird gemäß den bereits vorliegenden Richtlinienvorschlägen eine Steuerbegünstigung bzw. Steuerbefreiung für Biokraftstoffe angestrebt.

Stromsteuer. Der in kleineren pflanzenölbetriebenen Blockheizkraftwerken erzeugte Strom ist von der Stromsteuer befreit wenn er in räumlichem Zusammenhang zu dieser Anlage entnommen wird. Diese Befreiung ergibt sich aus §9 Abs. 1 des Stromsteuergesetzes (StromStG), sie gilt für Strom, der

- zur Stromerzeugung entnommen wird, z. B. Strom, der für Neben- und Hilfsanlagen der Stromerzeugungseinheit,
- aus erneuerbaren Energieträgern erzeugt und aus einem ausschließlich aus solchen Energieträgern gespeisten Netz oder einer entsprechenden Leitung entnommen wird und
- wenn er in Anlagen mit einer Nennleistung bis zu 2 Megawatt erzeugt und in räumlichen Zusammenhang zu dieser Anlage entnommen und von demjenigen, der die Anlage betreibt oder betreiben lässt, geleistet wird.

Die steuerfreie Verwendung von Strom zur Stromerzeugung ist erlaubnispflichtig, das heißt, dass vom örtlich zuständigen Hauptzollamt auf Antrag eine entsprechende Erlaubnis mit Erlaubnisschein erteilt werden muss. Gemäß §10 der Verordnung zur Durchführung des Stromsteuergesetzes (Stromsteuer-Durchführungsverordnung – StromStV) kann aber auf eine förmliche Einzelerlaubnis verzichtet werden, wenn es sich um eine Stromentnahme gemäß Punkt 1 und 3 der oben genannten Ausnahmen handelt.

10.5.5 Stromeinspeisung und -vergütung

Die Abnahme und Vergütung von elektrischem Strom aus Pflanzenöl-BHKW ist im Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) geregelt /10-9/. Das Gesetz verpflichtet den Netzbetreiber, entsprechende Anlagen zur Erzeugung von Strom aus regenerativen Energiequellen an das Netz anzuschließen, den gesamten angebotenen Strom aus diesen Anlagen vorrangig abzunehmen und den eingespeisten Strom zu vergüten. Die Vergütung hängt von der installierten elektrischen Leistung und vom Jahr der Inbetriebnahme ab, sie wird beginnend ab dem 1.1.2002 für Neuanlagen jährlich um 1 % gesenkt (auf eine Stelle hinter dem Komma gerundet). Demnach ergibt sich die in Tabelle 10.4 bis zum Jahr 2006 dargestellte Einspeisevergütung. Sie wird gleichbleibend für die Dauer von 20 Jahren (ohne Inbetriebnahmejahr) gewährt. Die hier dargestellten Tarife gelten auch für die Erzeugung von Strom aus Biogas oder Festbrennstoffen. Für die übrigen Erneuerbaren Energieträger (z. B. Solarstrom, Windkraft) gelten dagegen jeweils eigene Einspeisungsvergütungen.

Tabelle 10.4: Mindestvergütungssätze in €/kWh für die Einspeisung von elektrischem Strom aus neu in Betrieb genommenen Pflanzenöl-BHKW (nach /10-9/)

elektrische Leistung	Vergütung (ct/kWh) bei Inbetriebnahmejahr:				
	2002	2003	2004	2005	2006
bis 500 kW_{el}	10,1	10,0	9,9	9,8	9,7
bis 5 MW_{el}	9,1	9,0	8,9	8,8	8,8
bis 20 MW_{el}	8,6	8,5	8,4	8,4	8,3

Die notwendigen Anschlusskosten an den technisch und wirtschaftlich günstigsten Verknüpfungspunkt des Netzes sind vom Anlagenbetreiber zu tragen. Kosten für einen evtl. erforderlichen Netzausbau trägt der Netzbetreiber /10-9/.

10.6 Emissionen und Wirkungsgrade

Emissionen pflanzenölbetriebener Motoren. Über den Schadstoffausstoß von Pflanzenölmotoren liegen verschiedene Studien vor, die sich zumeist auf den Einsatz in Fahrzeugen beziehen /10-18/, /10-19/, /10-10/. Sie zeigen, dass der Betrieb von herkömmlichen, für Pflanzenöl nur bedingt geeigneten (z. B. Vorkammer-)Dieselmotoren mit Pflanzenöl bei den Abgaskomponenten Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffen (HC), Partikelmasse und Benzol im Mittel zu einer Erhöhung um etwa 50 %, bei den Aldehyden um ca. 120 % führt. Dies ist in erster Linie auf die nicht für Pflanzenöl geeigneten bzw. optimierten Motoren und die dadurch schlechtere Verbrennung zurückzuführen. Bei den Stickstoffoxiden (NO_x) und den polyzyklisch aromatischen Kohlenwasserstoffen treten dagegen keine nennenswerten Unterschiede auf, während die Schwefeloxidemissionen (SO_x) im Pflanzenölbetrieb deutlich gemindert werden, da Pflanzenöl im Gegensatz zu herkömmlichen Dieselkraftstoff nur sehr geringe Mengen an Schwefel enthält. Dieser Vorteil von Pflanzenölkraftstoff wird allerdings durch die Einführung von schwefelarmem Dieselkraftstoff kompensiert.

Vergleicht man dagegen richtigerweise die Emissionen von pflanzenölbetriebenen pflanzenöltaug-

lichen Motoren mit dieselbetriebenen Motoren, so ergibt sich gemittelt über alle vorliegenden Untersuchungen für CO und NO_x keine Veränderung; für HC und die Partikelmasse wird dagegen eine Halbierung des Emissionsniveaus gegenüber Dieselkraftstoff festgestellt.

Emissionen von Stationärmotoren (BHKW). Über Stationärmotoren in BHKW wurden weitaus weniger Untersuchungen angestellt. Für den hier betrachteten Bereich der kleineren Anlagenleistungen liegen jedoch einige belastbare Messergebnisse von drei pflanzenölbetriebenen BHKW unterschiedlicher Leistungsklassen (8, 60 und 110 kW_{el}) im Praxiseinsatz vor, wobei ein Vergleich mit Dieselkraftstoff- oder Heizölbetrieb nicht vorgenommen wurde, da es sich um Motoren handelt, die ausschließlich mit Pflanzenölkraftstoff betrieben werden /10-20/, /10-21/, /10-22/.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 10.5 dargestellt. Der darin aufgeführte Vergleich mit den Emissionsbegrenzungen dient nur der allgemeinen Orientierung, da es sich in allen drei Fällen um eine Feuerungswärmeleistung von weniger als 1 MW (ca. 400 kW_{el}) handelt und die Anlagen somit immissionsschutzrechtlich nicht genehmigungsbedürftig sind (Kapitel 10.5.1), das heißt, dass die TA Luft Grenzwerte für sie nicht gelten.

Gemäß Tabelle 10.5 ist bei Pflanzenöl-BHKW zwischen 8 und 110 kW_{el} mit Kohlenmonoxidemissionen (CO) von 20 bis ca. 200 mg/Nm³ zu rechnen. Diese vergleichsweise geringen CO-Emissionen sind ebenso wie die niedrigen Kohlenwasserstoffemissionen (HC) von ca. 4 bis 11 mg/Nm³ in erster Linie auf die Verwendung von Oxidationskatalysatoren bei allen drei untersuchten BHKW zurückzuführen. Derartige Katalysatoren erreichen Umsetzungsraten von ca. 70 bis 90 %, sie werden heute relativ häufig eingesetzt. Der Einsatz von Oxidationskatalysatoren ist bei Pflanzenölmotoren besonders geeignet, da sie auch zu einer deutlichen Verringerung von Aldehyden und Gerüchen beitragen und auf Grund des geringen Schwefelgehalts von Pflanzenöl eine hohe Langzeitwirksamkeit aufweisen.

Somit ließe sich die Emissionsbegrenzung der TA Luft für CO – wenn sie auch bei den kleineren BHKW einschlägig wäre – ohne weiteres einhalten. Anders wäre dies beim NO_x-Ausstoß, der mit den gemessenen 2000 bis 3500 mg/Nm³ deutlich über dem TA-Luft-Grenzwert liegt. Aggregate mit Wirbelkammer (vgl. BHKW 1 in Tabelle 10.5) weisen hier bekanntermaßen leichte Vorteile gegenüber den Motoren mit Direkteinspritzung (BHKW 2 und 3) auf. Eine deutliche Emissionsminderung kann voraussichtlich nur durch nachmotorische Maßnahmen (Entstickungskatalysatoren) erreicht werden.

Auch bei Staub zeigt sich, dass mit nachmotorischen Maßnahmen wie Partikelfiltern (BHKW 3) sehr niedrige Emissionswerte von ca. 3 mg/Nm³ erreich-

Tabelle 10.5: Abgasemissionen von Pflanzenöl-BHKW bezogen auf trockenes Abgas unter Normbedingungen (0 °C, 1013 mbar) und 5 % Bezugssauerstoffgehalt

Abgaskomponente (mg/Nm³)[a]		BHKW 1 (IDI)[b] Nennlast: 8 kW_{el}	BHKW 2 (DI)[c] Teillast: 40 kW_{el}	BHKW 3 (DI)[c] mit Rußfilter Nennlast 110 kW_{el}		Emissionsbegrenzung TA Luft 2002[d] (nicht bindend für diese Leistungsklasse)
				Modul 1	Modul 2	
CO	Mittelwert (Spanne)	23,6 (12,0-36,7)	38,8 (16,0-49,4)	55,8 (36,0-75,7)	183,4 (59,5-291)	300
NO_x	Mittelwert (Spanne)	2026 (1901-2295)	2793 (2220-3582)	3329 (3313-3345)	2791 (2691-2862)	1000
HC	Mittelwert (Spanne)	3,7 (2,0-6,0)	11,2 (9,2-12,5)	7,0 (6,7-7,3)	10,2 (6,5-15,3)	–
Partikelmasse (Staub)	Mittelwert (Spanne)	79,5 (60,0-136,0)	100,3 (68,8-166,0)	2,6 (1,7-3,5)	3,7 (2,4-5,0)	20
Anzahl Messtage:		*6*	*4*	*2*	*3*	
Anzahl Halbstundenmittelwerte:		*25*	*16*	*6*	*12*	

a. Angaben in Milligramm pro Normkubikmeter (mg/Nm³), trockenes Abgas, 0 °C, 1013 mbar, 5 % Bezugssauerstoff
b. IDI = Motor mit indirekter Einspritzung, hier: Wirbelkammer
c. DI = Motor mit Direkteinspritzung
d. TA-Luft 2002 /8-4/, gilt nur für Anlagen > 1 MW Feuerungswärmeleistung (ca. 400 kW_{el})

bar sind. Bei kleineren Anlagen (BHKW 1 und 2) werden derartige Filter jedoch aus Kostengründen selten verwendet, so dass der Staubausstoß um ein Vielfaches darüber liegt.

Neben den besonders wirksamen nachmotorischen und den motorischen Emissionsminderungsmaßnahmen kommt auch der Qualitätssicherung beim eingesetzten Pflanzenöl eine gestiegene Bedeutung für den Emissionsschutz zu (vgl. Kapitel 10.4).

Wirkungsgrad. Der Gesamtwirkungsgrad setzt sich aus dem elektrischen und thermischen Wirkungsgrad zusammen, die aus den Quotienten der elektrischen und thermischen Leistung und der eingesetzten Brennstoffwärmeleistung gebildet werden. In der oben genannten Untersuchung über pflanzenölbetriebene Blockheizkraftwerke der Leistungsklassen 8, 60 und 110 kW_{el} wurden elektrische Wirkungsgrade von 26, 32 und 36 % ermittelt. Vorkammermotoren weisen ebenso wie Aggregate im Teillastbetrieb einen schlechteren Wirkungsgrad auf als direkt einspritzende Motoren im Nennlastbetrieb. Die thermischen Wirkungsgrade der drei Aggregate betragen je nach Ausführung der Anlage und Sauberkeit der Wärmeübertragerflächen zwischen ca. 40 und 60 %. Daraus ergeben sich Gesamtwirkungsgrade zwischen ca. 70 und 90 %.

10.7 Kosten und Wirtschaftlichkeit

10.7.1 Berechnungsgrundlagen

Die für die Wirtschaftlichkeitsberechnung benötigten Jahreskosten eines BHKW ergeben sich aus der Summe der kapitalgebundenen, verbrauchsgebundenen und betriebsgebundenen Kosten. Deren Berechnung wird nachfolgend erläutert.

Kapitalgebundene Kosten. Die Kosten für das gebundene Kapital leiten sich aus den erforderlichen Investitionen für die gesamte BHKW-Anlage ab. Zusätzlich hat auch die Abschreibungsdauer und der zu Grunde gelegte Zinssatz entscheidenden Einfluss auf die Höhe der kapitalgebundenen Kosten.

Für die Berechnung der jährlichen Kosten der Gesamtinvestition wird gemäß VDI-Richtlinie 2067 /10-24/ die Annuitätenmethode angewendet; sie wird in Kapitel 9.3.1 näher beschrieben. Die Gesamt-Investitionssumme wiederum setzt sich zusammen aus den Investitionen der einzelnen BHKW-Komponenten. Bei einigen dieser Komponenten sind für

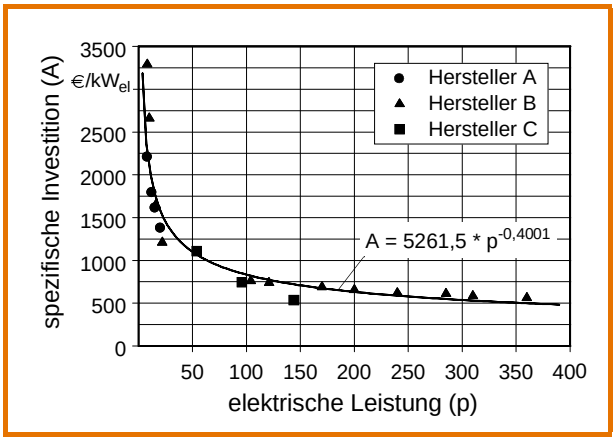


Abb. 10.4: Leistungsabhängige spezifische Investitionssumme (Anschaffungspreis) für ein Pflanzenöl-BHKW-Modul im Netzparallelbetrieb (ohne Planung, Gebäude, Kamin, Kraftstofftank) (nach Herstellerangaben in 1999)

Pflanzenöl-BHKW die gleichen Kosten wie bei heizölbetriebenen BHKW anzusetzen. Das betrifft die thermische und elektrische Einbindung, die Abgasanlage, bauliche Maßnahmen und die Planungskosten. Für den Motor ergeben sich allerdings in der Regel höhere Kosten, da spezielle Pflanzenölmotoren im Allgemeinen in geringer Stückzahl gefertigt werden oder es sich um umgerüstete konventionelle Motoren handelt. Zur überschlägigen Kostenberechnung lässt sich die Investitionssumme für ein BHKW-Modul aus Abb. 10.4 ableiten. Eine genauere Kalkulation sollte jedoch auf Basis detaillierter Kostenangebote erfolgen.

Bei den weiteren Investitionen für Kraftstofftank und Kraftstoffzuführung ist von annähernd gleichen Kosten wie bei Heizöl auszugehen. Geringfügig höhere Kosten ergeben sich lediglich wenn höherwertige pflanzenöltaugliche Komponenten verwendet werden sollen (z. B. Edelstahltanks); diese Mehrkosten werden aber oft durch geringere Sicherheitsaufwendungen für den Boden- und Gewässerschutz kompensiert (z. B. keine regelmäßigen Tankprüfungen).

Die Abschreibungsdauer sollte entsprechend der üblichen Gesamtlaufzeit des BHKW festgelegt werden, sie liegt typischerweise bei ca. 12 bis 15 Jahren /10-11/. Die technische Lebensdauer aller Komponenten dürfte bei Pflanzenöl-BHKW mit ausgereifter Technik ebenso hoch sein wie bei Dieselaggregaten, allerdings liegen bisher noch keine Daten über die tatsächliche maximale Laufleistung der Motoren vor. Erfahrungen zeigen, dass auch Aggregate mit einer Laufzeit von bis zu ca. 20 000 Betriebsstunden keine außergewöhnlichen Verschleißerscheinungen aufweisen.

Verbrauchsgebundene Kosten. Hierzu zählen Brennstoffkosten und die Hilfsenergiekosten wie etwa für Pumpen. Für Rapsöl als Brennstoff kann ein fester Bezugspreis angenommen werden, der allerdings je nach Lieferant, Bezugsmenge, Angebot und Nachfrage sowie der Jahreszeit Schwankungen unterworfen sein kann.

Die mittleren Preise für Rapsöl liegen derzeit zwischen ca. 0,45 €/l und 0,60 €/l (zzgl. MwSt.). Höhere Kraftstoffkosten innerhalb der Preisspanne können dann in Kauf genommen werden, wenn zuverlässig eine gesicherte hohe Rapsölqualität geliefert wird, wodurch Tankreinigungen, Kraftstofffilterwechsel oder andere Instandsetzungsmaßnahmen eingespart werden können.

Betriebsgebundene Kosten. Nach VDI-Richtlinie 2067 /10-24/ fallen als betriebsgebundene Kosten in erster Linie die Instandhaltungs- und ggf. Personalkosten an. Die jährlichen Instandhaltungskosten werden als Pauschalsätze in Prozent der Investitionskosten angenommen. In Anbetracht der neueren Technologie und der geringeren Erfahrungen mit Pflanzenöl-BHKW ist die Verwendung der am oberen Rand der Bandbreite liegenden Kostenansätze sinnvoll. Damit wird auch den bei manchen Aggregaten kürzeren Wartungsintervallen (v. a. Motoröl- und Kraftstofffilterwechsel) oder dem teilweise vorgeschriebenen Einsatz teuerer Betriebsmittel (Motoröl) Rechnung getragen. Bei den Instandhaltungskosten durch einen Fachkundendienst (z. B. Anlagenbauer oder Motorenhersteller) muss berücksichtigt werden, dass dafür im Einzelfall höhere Fahrtkosten einzurechnen sind, weil erfahrene Fachwerkstätten für Pflanzenölmotoren noch wenig verbreitet sind.

Der Kostenansatz für das notwendige Personal zur Bedienung und Überwachung der Anlage hängt davon ab, ob vorhandene Kapazitäten ausreichen oder ob zusätzliches Personal eingestellt werden muss. Sonstige Kosten nach VDI 2067 (z. B. Schornsteinfeger, Verwaltung) werden in Prozent der Gesamtinvestitionssumme abgeschätzt und unterscheiden sich normalerweise nicht zwischen Pflanzenöl- und Heizölaggregaten.

Erlöse und Gutschriften. Entscheidend für die Wirtschaftlichkeit von BHKW sind vor allem die erzielbaren Preise oder die anrechenbaren Gutschriften für Strom und gegebenenfalls für Wärme.

Bei der Einspeisung von Strom aus Biomasse (Pflanzenöl) wird gemäß dem Erneuerbaren-Energien-Gesetz (EEG) eine gesetzlich festgeschriebene Mindestvergütung von ca. 0,10 €/kWh gewährt (vgl. Kapitel 10.5.5). Die Bewertung des Eigenverbrauchs der produzierten Elektrizität richtet sich dagegen nach den für den Nutzer relevanten Strompreisen, die sich für Tarifkunden (Niederspannungsebene) und Sondervertragskunden (vorrangig Mittelspannungsebene mit hohem Verbrauch) unterscheiden.

Förderung. Die Nutzung erneuerbarer Energieträger und der Betrieb von Blockheizkraftwerken wird durch diverse Förderprogramme von EU, Bund, Länder, Kommunen und Energieversorger unterstützt. Je nachdem, ob Fördermittel oder Beihilfen angerechnet werden können, kann sich die Rentabilität von pflanzenölbetriebenen BHKW deutlich verbessern. Informationen über Förderprogramme und Mittelvergabe sind u. a. bei den im Anhang F genannten Stellen erhältlich.

10.7.2 Wirtschaftlichkeitsrechnung

Die beim Einsatz eines BHKW anfallenden Kosten werden entweder nur auf die produzierte Wärme oder nur auf den erzeugten Strom bezogen. Die spezifischen Wärmegestehungskosten beispielsweise ergeben sich aus den jährlichen Gesamtkosten abzüglich der Erlöse für die produzierte elektrische Energie, dividiert durch die jährlich erzeugte Wärmemenge. Sind diese Wärmegestehungskosten niedriger als die eines Vergleichssystems, so arbeitet das BHKW rentabel.

In Tabelle 10.6 werden die Wärmebereitstellungskosten für 3 Berechnungsbeispiele ermittelt. Dabei handelt es sich um eine Überschlagsrechnung; vereinfachend werden daher die in einem Gesamtenergiekonzept notwendigen Komponenten wie Spitzenlastversorgung, Pufferspeicher und Wärmeverteilung nicht berücksichtigt. Das Gleiche gilt für die Planungskosten. Insgesamt wurden drei Szenarien aufgestellt, die durch zwei verschiedene Anlagengrößen und durch unterschiedliche Rahmenbedingungen charakterisiert sind.

In Szenario 1 (BHKW mit 8 kW_{el}) und Szenario 3 (BHKW mit 110 kW_{el}) wurden Annahmen getroffen, die sich weitgehend nach der VDI-Richtlinie 2067 /10-24/ richten. Dabei wurden für Instandhaltung, Personal und Verwaltung durchweg die oberen Kostenansätze angenommen. In Szenario 2 werden dagegen besonders günstige Rahmenbedingungen vorausgesetzt.

Die spezifischen Investitionskosten für die BHKW-Module basieren in allen Fällen auf der Kurven-

Tabelle 10.6: Beispiel für die Berechnung der Wärmegestehungskosten in Pflanzenöl-BHKW

Annahme / Kostenart		Szenario 1 (Standard)	Szenario 2 (günstig)	Szenario 3 (Standard)
Annahmen:				
BHKW elektrische Leistung	kW_{el}	8	8	110
BHKW thermische Leistung	kW_{th}	15	15	110
Anschaffung BHKW-Modul komplett[a]	€	18 318	18 318	88 255
bauliche Investitionen (Gebäude anteilig, Tanks, Kamin)[b]	€	10 400	2 000	143 000
Gesamtinvestition	€	28 718	20 318	231 255
jährliche Instandhaltungskosten für BHKW-Modul	% d. Invest.	9,0	3,0	9,0
jährliche Instandhaltungskosten für bauliche Anlagen	% d. Invest.	1,5	0	1,5
jährliche Personal- und Verwaltungskosten (ohne Bau)[c]	% d. Invest.	6,0	0	6,0
jährliche Versicherungskosten	% d. Invest.	1,5	0	1,5
jährliche Hilfsenergiekosten, Anteilig an Kraftstoffkosten	%	1,0	1,0	1,0
Kraftstoffverbrauch bei Nennlast	l/h	3,1	3,1	31,0
Kraftstoffbezugskosten (inkl. Anlieferung)	€/l	0,50	0,40	0,50
Jahresauslastung BHKW bei Nennlast	H	4 000	6 000	4 000
jährliche Kosten:				
Annuität[d]	€/a	2 700	2 043	20 273
Wartung, Instandhaltung gesamt[e]	€/a	1 805	550	10 088
Versicherung	€/a	275	0	1 324
Personal, Verwaltung, etc.	€/a	1 099	0	5 295
Hilfsenergie	€/a	62	74	620
Kraftstoff	€/a	6 200	7 440	62 000
Jahresenergieertrag:				
thermisch	KWh	60 000	90 000	440 000
elektrisch	KWh	32 000	48 000	440 000
Erlöse (Stromgutschrift):				
für Einspeisung nach EEG[f]	€/a	3 200	--	44 000
für Eigenverbrauch und Einspeisung nach EEG (je 50 %)[g]	€/a	--	6 240	--
Wärmekosten (inkl. Gutschriften):				
bei Stromgutschrift nach EEG[f]	€/kWh	0,149	--	0,126
bei Stromgutschrift nach Eigenverbrauch und EEG (je 50%)[g]	€/kWh	--	0,051	--

a. Investitionssummen für BHKW-Modul (A) in Abhängigkeit von der elektrischen Leistung (p): $A = 5261{,}5 * p^{-0{,}4001}$ (vgl. Abb. 10.4)
b. Investitionssumme für bauliche Anlagen: Szenario 1 und 3: 1300 €/kW_{el}, Szenario 2: 250 €/kW_{el}
c. bezogen auf Gesamtinvestition abzüglich bauliche Investitionen (Gebäude, Tanks, Kamin)
d. Zinssatz: 6 %, angenommene Nutzungsdauer: 15 Jahre für BHKW-Modul, bzw. 25 Jahre für baulichen Teil
e. inklusive Motoröl (Ölwechselintervall 300 Betriebsstunden)
f. Stromeinspeisevergütung nach Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) für Inbetriebnahmejahr 2003: 0,10 €/kWh (vgl. Kapitel 10.5.5)
g. Mischrechnung: angenommene Kosten für Stromfremdbezug 0,13 €/kWh; EEG: siehe Fußnote f

gleichung in Abb. 10.4. Die Investitionsanteile für bauliche Aufwendungen, d. h. Gebäude, Grundstück, Abgasabführung und Kraftstofflagerung sind in hohem Maße von der Anlagengröße und den jeweiligen standörtlichen Voraussetzungen abhängig. Bei größeren BHKW-Anlagen werden für diesen baulichen Teil häufig Investitionskosten von ca. 160 bis 220 €/kW_{el} angesetzt /10-25/. Insbesondere bei kleineren pflanzenölbetriebenen BHKW (z. B. 8 kW_{el}) können aber im Einzelfall die spezifischen Investitionskosten ohne weiteres um ein Vielfaches höher liegen /10-15/. In den hier betrachteten Szenarien 1 und 3 (Tabelle 10.6) wird eine mittlere spezifische Investition für die baulichen Aufwendungen (siehe oben) von 1300 €/kW_{el} angenommen.

Die günstigeren Rahmenbedingungen in Szenario 2 betreffen im Wesentlichen die niedrigeren Kraftstoffkosten (z. B. bei eigener Rapsölproduktion), eine höhere Anlagenauslastung (Wärmebedarf auch im Sommer, z. B. für Trocknungsanlagen), geringere bauliche Investitionen (z. B. bei vorhandenem Aufstellraum und Lagertank), geringeren Wartungsaufwand (durch freie Kapazitäten vorhandener Arbeitskräfte bzw. Nichtanrechnung der eigenen Arbeitszeit) und eine 50 %-ige Eigennutzung des erzeugten Stroms, der sonst für 0,13 €/kWh fremdbezogen werden müsste.

Gemäß Tabelle 10.6 ergeben sich für das BHKW mit 8 kW_{el} in Szenario 1 Wärmegestehungskosten von 0,15 €/kWh und für das BHKW mit 110 kW_{el} (Szenario 3) 0,13 €/kWh. Ein wirtschaftlicher Betrieb dieser Anlagen dürfte also unter den getroffenen Annahmen und beim derzeitigen Preisniveau für fossile Konkurrenzbrennstoffe (Heizöl, Erdgas) kaum möglich sein. Unter günstigen Rahmenbedingungen (Szenario 2) können die Wärmegestehungskosten jedoch auch deutlich niedriger liegen (0,05 €/kWh).

11 Quellenverzeichnis

/1-1/ Biomasse Info-Zentrum (BIZ): Broschüre: „Holzpellets – Energie, die nachwächst“. Stuttgart, 2001, 34 S.

/1-2/ BMU: Nationales Klimaschutzprogramm, Beschluss der Bundesregierung vom 18. Oktober 2000, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin

/1-3/ BMU: Nationales Klimaschutzprogramm, Beschluss der Bundesregierung vom 18. Oktober 2000, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin

/1-4/ EEG: Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG) vom 1.4.2000, (BGBl. I, Nr. 13, S. 305-309)

/1-5/ EU-Kommission: Energie für die Zukunft: Erneuerbare Energieträger. Weißbuch für eine Gemeinschaftsstrategie (Kom(87)599 endg.), Kommission der Europäischen Gemeinschaften, Brüssel 1997

/1-6/ FNR (Hrsg.): Leitfaden Bioenergie – Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR), Gülzow, 2000

/1-7/ Hartmann, H.: Feuerungsanlagen für biogene Festbrennstoffe: Bedeutung der Bauarten und ihre Entwicklung im Markt. Wärmetechnik 41 (4), 1996, S. 209-211

/1-8/ Kaltschmitt, M; Hartmann, H. (Hrsg.): Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren. Springer Verlag, Berlin, 2001, 770 S.

/1-9/ Obernberger, I.; Hammerschmid, A.: Dezentrale Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungstechnologien — Potential, Einsatzgebiete, technische und wirtschaftliche Bewertung. Schriftenreihe Thermische Biomassenutzung (4). dbv-Verlag, Graz, 1999, 299 S.

/2-1/ Brunner GmbH (Firmenunterlagen) D-84307 Eggenfelden

/2-2/ Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) (Hrsg.): Energiedaten 1999; Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), Berlin, 1999

/2-3/ FNR (Hrsg.): Leitfaden Bioenergie – Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR), Gülzow, 2000

/2-4/ Kaltschmitt, M; Hartmann, H. (Hrsg.): Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren. Springer Verlag, Berlin, 2001, 770 S.

/2-5/ Hartmann, H.; Kaltschmitt, M. (Hrsg.): Biomasse als erneuerbarer Energieträger – Eine technische, ökologische und ökonomische Analyse im Kontext der übrigen erneuerbaren Energien. Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“, Band 3 (Neubearbeitung), Landwirtschaftsverlag, Münster-Hiltrup, 2002, 692 S.

/2-6/ Nussbaumer, T., Hartmann, H. (2001): Automatisch beschickte Feuerungen. In: Kaltschmitt, M.; Hartmann, H. (Hrsg.): Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren. Springer Verlag, Berlin, 2001, S. 345-363

/2-7/ Schneider, S.; Kaltschmitt, M.: Potenziale und Nutzung. In: Hartmann, H.; Kaltschmitt, M. (Hrsg.): Biomasse als erneuerbarer Energieträger – Eine technische, ökologische und ökonomische Analyse im Kontext der übrigen Erneuerbaren Energien. Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“, Band 3 (Neubearbeitung), Landwirtschaftsverlag, Münster-Hiltrup, 2002, 692 S.

/2-8/ Verband der Elektrizitätswirtschaft (VDEW): Energieverbrauch in Deutschland 2000. Eigenverlag Frankfurt, 2001. Download: www.ag-energiebilanzen.de

/3-1/ A.P. Bioenergietechnik GmbH, D-92242 Hirschau

/3-2/ BGU Südharzer Maschinenbau GmbH, Helmestr. 94, D-99734 Nordhausen (Firmenunterlagen)

/3-3/ Biomasse Infozentrum (BIZ): Broschüre „Holzpellets – Energie die nachwächst“. BIZ, Universität Stuttgart, Juni 2001, 35 S.

/3-4/ BMU: Verordnung über die Entsorgung von Altholz (Entwurf, Stand 20.9.2000), Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bonn

/3-5/ Brüggemann, C.: Brennholzbereitung mit Spaltern und Hackern. Energie Pflanzen 1 (1), 1997, S. 16-19.

/3-6/ Brusche, R.: Hackschnitzel aus Schwachholz. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, KTBL (Hrsg.), Landwirtschaftsverlag Münster, 1983, KTBL-Schrift 290, 96 S.

/3-7/ Deutsches Institut für Normung (Hrsg.): DIN 51731 (Prüfung fester Brennstoffe – Presslinge aus naturbelassenem Holz - Anforderungen und Prüfung). Beuth Verlag, Berlin, 1996

/3-8/ Dreiner, K.; Frühwald, A.; Küppers, J.-G.; Schweinle, J.; Thoroe, C.: Holz als umweltfreundlicher Energieträger – Eine Kosten-Nutzen-Untersuchung. Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (Hrsg.), Landwirtschaftsverlag Münster, 1994, Reihe Angewandte Wissenschaft, Nr. 432, 192 S.

/3-9/ Feicht, E.; Wittkopf, S.; Ohrner, G.; Mühlen, A. von; Nowak, D.: Gefährdungen durch Holz-Hackschnitzel analysiert – Belastungen durch Pilzsporen beim Umgang mit Holzschnitzeln und deren weitere Vermeidung. Holz-Zentralblatt Nr. 39/40, 2002, S. 500

/3-10/ Feller, S.; Webenau, B.; Weixler, H.; Krausenboeck, B.; Güldner, A.; Remler, N.: Teilmechanisierte Bereitstellung, Lagerung und Logistik von Waldhackschnitzeln. LWF-Schriftenreihe Nr. 21, Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Freising, 1999

/3-11/ Forestbaler Sarl, Fontaine-Daniel, F-53100 Mayenne, (Firmenunterlagen)

/3-12/ Gislerud, O.: Storage and Treatment of Wood Fuel. Norwegian Forest Research Institute, Ås-NLH, Norwegen

/3-13/ Gustafsson, G.: Artificial Drying of Wood Chips for Energy Purposes. In: Fazzolare, R.A.; Smith, C.B.: Beyond the Energy Crisis -- Opportunity and Challenge; Third International Conference on Energy Use Management, Berlin, 1981, S. A151-A171

/3-14/ Hartmann, H.: Analyse und Bewertung der Systeme zur Hochdruckverdichtung von Halmgut. Reihe „Gelbes Heft“ 60, Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, München, 1996

/3-15/ Hartmann, H.; Madeker, U.: Der Handel mit biogenen Festbrennstoffen – Anbieter, Absatzmengen, Qualitäten, Service, Preise. Landtechnik Bericht Nr. 28, Landtechnik Weihenstephan (Hrsg.), Eigenverlag, 1997, Freising, 65 S.

/3-16/ Hartmann, H.; Thuneke, K.: Ernteverfahren für Kurzumtriebsplantagen – Maschinenerprobung und Modellbetrachtungen. Landtechnik Bericht, Heft 29, Eigenverlag Landtechnik Weihenstephan (Hrsg.), Freising, 1997, 98 S.

/3-17/ Hartmann, H.; Böhm, T.; Maier, L.: Naturbelassene biogene Festbrennstoffe – Umweltrelevante Eigenschaften und Einflussmöglichkeiten. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (Hrsg.), München, 2000, Reihe „Materialien“, Nr. 154

/3-18/ Hartmann, H.: Kaltschmitt, M.: Bereitstellungskonzepte. In: Kaltschmitt, M.; Hartmann, H. (Hrsg.): Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren. Springer Verlag, Berlin, 2001, S. 123-154

/3-19/ Hartmann, H.: Ernte und Aufbereitung. In: Kaltschmitt, M.; Hartmann, H. (Hrsg.): Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren. Springer Verlag, Berlin, 2001, S. 155-196

/3-20/ Hartmann, H.: Transport, Lagerung, Konservierung und Trocknung. In: Kaltschmitt, M.; Hartmann, H. (Hrsg.): Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren. Springer Verlag, Berlin, 2001, S. 197-238

/3-21/ IBW, Ingenieur Büro Weiss, Tanne, CH-9055 Bühler, Schweiz (Firmenunterlagen zu „Woodmax“)

/3-22/ Igland Forstmaschinen (Firmeninformation), Bergstraße 30, D-85543 Steinhörning

/3-23/ Jirjis, R.: Storage and Drying of Biomass – New Concepts. Proceedings of the 1st International Biomass Summer School 1996, Institut für Verfahrenstechnik, TU-Graz, Eigenverlag, Graz, 1996

/3-24/ Jonas, A.; Görtler, F.; Schuster, K.: Holz und Energie. Niederösterreichische Landes-Landwirtschaftskammer, Wien, 1990, 5. Auflage

/3-25/ Lewandowski, I. Energiepflanzenproduktion. In: Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren. Springer Verlag, Berlin, 2001, S. 57-94

/3-26/ LTV: Weihenstephaner Bauprogramm. Landtechnischer Verein in Bayern e.V. (LTV), 85354 Freising-Weihenstephan

/3-27/ Kaltschmitt, M; Hartmann, H. (2001): Nebenprodukte, Rückstände und Abfälle: Holzartige Biomasse. In: Kaltschmitt, M.; Hartmann, H. (Hrsg.): Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren. Springer Verlag, Berlin, 2001, S. 95-109.

/3-28/ Kristensen, E.F.; Kofmann, P.D.: Pressure resistance to air flow during ventilation of different types of wood fuel chip. Biomass & Bioenergy 18 (2000); S. 175-180

/3-29/ Kröll, K; Kast, W. (Hrsg.): Trocknen und Trockner in der Produktion. Springer, Berlin, 1989

/3-30/ Ledin, S.; Willebrand, E. (Eds.): Handbook on How to Grow Short Rotation Forests. Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden, 2nd edn., 1996

/3-31/ Mall GmbH, Hüfinger Str. 39-45, 78166 Donaueschingen-Pfohren (Firmenunterlagen)

/3-32/ Marutzky, R.; Keserü, G.: Herstellung von Spanplatten aus gelagerten Hackschnitzeln. Holz-Zentralblatt 107(1981), 107, S. 1623-1625, 107(1981), 115, S. 1779-1780; 108(1982), 7, S. 81-82; 108(1982), 20, S. 275-276

/3-33/ Matthies, H.J.: Der Strömungswiderstand beim Belüften landwirtschaftlicher Erntegüter; VDI-Forschungsheft Nr. 454, VDI, Düsseldorf, 1956

/3-34/ Meiller Fahrzeug und Machinenfabrik GmbH, Untermenzinger Straße 1, 80997 München (Firmenunterlagen)

/3-35/ Mitchell, C.P.; Hudson, J.B.; Gardner, D.N.A.; Storry, P.G.S.; Gray, I.M.: Wood Fuel Supply Strategies. Vol. 1: Contractor Report, ETSU B1176-P1, Department of Energy, UK, 1990

/3-36/ Mitchell, C.P.: Development of Harvesting and Storage Technologies Essential for the Establishment of Short Rotation Forestry as an Economic Source of Fuel in Europe. Final technical report for the European Comission (AAIR3), Project No. CT 941102. Aberdeen University (Hrsg.), UK, Eigenverlag, 1997, 74 p.

/3-37/ Nellist, M.E.; Barlett, D.I.; Moreea, S.B.M.: Storage Trials with Arable Coppice. In: Mattsson, J.E.; Michell, C.P.; Tordmar, K. (Hrsg.): Preparation and Supply of High Quality Wood Fuels; Proceedings of IEA/BA Task IX Workshop in Garpenberg/Sweden, June 1994; Swedish University of Agricultural Sciences, Garpenberg, Schweden, 1994, S. 60-75

/3-38/ ÖkoFen GmbH, Mühlgasse, A-4132 Lembach 9 (Firmenunterlagen)
/3-39/ ÖNORM M7132: Energiewirtschaftliche Nutzung von Holz und Rinde als Brennstoff - Begriffsbestimmungen und brennstofftechnologische Merkmale. Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 1986
/3-40/ ÖNORM M 7135: Presslinge aus naturbelassenem Holz und naturbelassener Rinde – Pellets und Briketts, Anforderungen und Prüfbestimmungen. Österreichisches Normungsinstitut (Hrsg.), Wien, Österreich, 2000, 10 S.
/3-41/ ÖNORM M7136: Presslinge aus naturbelassenem Holz – Holzpellets: Qualitätssicherung in der Transport- und Lagerlogistik. Österreichisches Normungsinstitut (Hrsg.), 2002; 6 S.
/3-42/ ÖNORM M7137: (Vorschlag): Presslinge aus naturbelassenem Holz – Holzpellets. Anforderungen an die Pelletslagerung beim Verbraucher. Österreichisches Normungsinstitut (Hrsg.), 2002
/3-43/ Österreichisches Kuratorium für Landtechnik und Landesentwicklung (ÖKL): Einbau von Holzpelletsheizungen in Wohnhäuser, ÖKL, Wien, Österreich : 1999; 8 S, Merkblatt Nr. 66
/3-44/ Prankl, H.; Weingartmann, H.: Hackguttrocknung Wippenhamm. Forschungsbericht Nr. 40, Bundesanstalt für Landtechnik in Wieselburg, Wieselburg, Österreich, 1994
/3-45/ Remler, N.; Fischer, M.: Kosten und Leistung bei der Bereitstellung von Waldhackschnitzeln. Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, München, 1996, Bericht Nr. 11
/3-46/ Remmele, E. Widmann, B.: Schmierstoffe und Hydrauliköle auf Basis Rapsöl. Raps, Vol. 16, Nr. 4, 1998, S. 142-145
/3-47/ Rittel, L.: Einfachgebäude mit Rundholz bauen. Top Agrar 1990, 10, S. 84-88
/3-48/ Schneider, S.; Kaltschmitt, M.: Potenziale und Nutzung. In: Hartmann, H.; Kaltschmitt, M. (Hrsg.): Biomasse als erneuerbarer Energieträger – Eine technische, ökologische und ökonomische Analyse im Kontext der übrigen Erneuerbaren Energien. Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“, Band 3 (Neubearbeitung), Landwirtschaftsverlag, Münster-Hiltrup, 2002, 692 S..
/3-49/ Schön, H. et. al.: Landtechnik Bauwesen. Reihe „Die Landwirtschaft“, Band 3; BLV-Verlagsgesellschaft, München, 1998, 9. Auflage
/3-50/ Seeger, K.: Energietechnik in der Holzverarbeitung. DRW-Verlag Weinbrenner GmbH, Leinfelden-Echterdingen, 1989, 131 S.
/3-51/ Strehler, A.: Trocknung von Getreide, Körnermais und Raps im landwirtschaftlichen Betrieb. Arbeitsunterlagen D/96, Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft (DLG), Frankfurt, 1996
/3-52/ Tornado Trockner. Horstkötter GmbH, D-59245 Beckum
/3-53/ VSG Forsten: Vorschrift für Sicherheit und Gesundheitsschutz.
/3-54/ Weingartmann, H.: Hackguttrocknung. Landtechnische Schriften Nr. 178, Österreichisches Kuratorium für Landtechnik, Wien, 1991
/3-55/ Windhager Zentralheizung Deutzring 2, 86405 Meitingen (Firmenunterlagen)
/3-56/ Wippermann, H.J.: Wirtschaftliche Nutzung von Waldrestholz; Holzzentralblatt, DRW, Stuttgart, 1985

/4-1/ Centrale Marketinggesellschaft der deutschen Agrarwirtschaft (Hrsg.): Holz als Energierohstoff; Centrale Marketinggesellschaft der deutschen Agrarwirtschaft, Eigenverlag, Bonn, 1988, 2. Auflage
/4-2/ Deutsches Institut für Normung (Hrsg.): DIN 51705 (Prüfung fester Brennstoffe - Bestimmung der Schüttdichte); Beuth, Berlin, 1979
/4-3/ Deutsches Institut für Normung (Hrsg.): DIN 51 720 (Prüfung fester Brennstoffe - Bestimmung des Gehaltes an flüchtigen Bestandteilen); Beuth, Berlin, 1978
/4-4/ Deutsches Institut für Normung (Hrsg.): DIN 51 730 (Prüfung fester Brennstoffe - Bestimmung des Ascheschmelzverhaltens); Beuth, Berlin, 1984
/4-5/ Deutsches Institut für Normung (Hrsg.): DIN 51 731 (Prüfung fester Brennstoffe - Presslinge aus naturbelassenem Holz - Anforderungen und Prüfung); Beuth, Berlin, 1996
/4-6/ Hartmann, H.: Analyse und Bewertung der Systeme zur Hochdruckverdichtung von Halmgut; Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (Hrsg.), Eigenverlag, München, 1996, Reihe „Gelbes Heft“ 60
/4-7/ Hartmann, H.; Madeker, U.: Der Handel mit biogenen Festbrennstoffen - Anbieter, Absatzmengen, Qualitäten, Service, Preise. Landtechnik Bericht Nr. 28, Landtechnik Weihenstephan (Hrsg.), Eigenverlag, Freising, 1997, 65 S.
/4-8/ Hartmann, H.; Böhm, T., Maier, L.: Naturbelassene biogene Festbrennstoffe – Umweltrelevante Eigenschaften und Einflussmöglichkeiten. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (Hrsg.), München, 2000, Reihe „Materialien“, Nr. 154, 155 S.
/4-9/ Hartmann, H.: Grundlagen der Festbrennstoffnutzung – Brennstoffzusammensetzung und -eigenschaften. In: Kaltschmitt, M.; Hartmann, H. (Hrsg.): Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren. Springer Verlag, Berlin, 2001, S. 248-272
/4-10/ Launhardt, T.; Hartmann, H.; Link, H.; Schmid, V.: Verbrennungsversuche mit naturbelassenen biogenen Festbrennstoffen in einer Kleinfeuerungsanlage – Emissionen und Aschequalität. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (Hrsg.), München, 2000, Reihe „Materialien“, Nr. 156, 133 S.
/4-11/ Marutzky, R.: Moderne Holzfeuerungsanlagen. Centrale Marketinggesellschaft der deutschen Agrarwirtschaft (Hrsg.), Eigenverlag, Bonn, 1993

/4-12/ Mattsson, J.E.: Basic Handling Characteristics of Wood Fuel: Angle of Repose, Friction Against Surfaces and Tendency to Bridge Building for Different Assortments. Scand. J. For. Res. 1990, 5, S.583-597

/4-13/ Noger, D.; Pletscher, E.: Brennstoffkriminalität – Schnelltest. In: Siebtes Symposium Biobrennstoffe und umweltfreundliche Energietechnik, November 1998; OTTI-Technologie Kolleg, Eigenverlag, Regensburg, 1998, S. 173-180

/4-14/ Nussbaumer, T.; Kaltschmitt, M. Grundlagen der Festbrennstoffnutzung – Definitionen. In: Kaltschmitt, M.; Hartmann, H. (Hrsg.): Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren. Springer Verlag, Berlin, 2001, S. 239-247

/4-15/ Obernberger, I.: Nutzung fester Biomasse in Verbrennungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung des Verhaltens aschebildender Elemente; dbv, Graz, 1997

/4-16/ Österreichisches Normungsinstitut (Hrsg.): ÖNORM M7132 (Energiewirtschaftliche Nutzung von Holz und Rinde als Brennstoff - Begriffsbestimmungen und brennstofftechnologische Merkmale); Eigenverlag, Wien, 1998

/4-17/ ÖNORM M 7133: Energiehackgut, Anforderungen und Prüfbestimmungen. Österreichisches Normungsinstitut (Hrsg.), Wien, Österreich, 1998, 7 S.

/4-18/ ÖNORM M 7135: Presslinge aus naturbelassenem Holz und naturbelassener Rinde – Pellets und Briketts, Anforderungen und Prüfbestimmungen. Österreichisches Normungsinstitut (Hrsg.), Wien, Österreich, 2000, 10 S.

/4-19/ Spliethoff, H.; Siegle, V.; Hein, K.R.G.: Erforderliche Eigenschaften holz- und halmgutartiger Biomasse bei einer Zufeuerung in existierenden Kraftwerksanlagen; Tagung „Biomasse als Festbrennstoff – Anforderungen, Einflussmöglichkeiten, Normung“, Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“ Band 6, Landwirtschaftsverlag,

/5-1/ Deutsches Institut für Normung (Hrsg.): DIN 51 720 (Prüfung fester Brennstoffe - Bestimmung des Gehaltes an flüchtigen Bestandteilen); Beuth, Berlin, 1978

/5-2/ Hartmann, H.: Grundlagen der Festbrennstoffnutzung – Brennstoffzusammensetzung und -eigenschaften. In: Kaltschmitt, M.; Hartmann, H. (Hrsg.): Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren. Springer Verlag, Berlin, 2001, S. 248-272

/5-3/ Hellwig. M.: Zum Abbrand von Holzbrennstoffen unter besonderer Berücksichtigung der zeitlichen Abläufe; Dissertation am Lehrstuhl für Landtechnik der Technischen Universität München, MEG-Schriftenreihe, Nr. 145, 1988, 141 S.

/5-4/ Nussbaumer, T.; Kaltschmitt, M. Grundlagen der Festbrennstoffnutzung – Definitionen. In: Kaltschmitt, M.; Hartmann, H. (Hrsg.): Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren. Springer Verlag, Berlin, 2001, S. 239-247

/5-5/ Nussbaumer, T.: Direkte thermische Umwandlung – Grundlagen. In: Kaltschmitt, M.; Hartmann, H. (Hrsg.): Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren. Springer Verlag, Berlin, 2001, S. 287-322

/5-6/ Launhardt, T.; Hurm, R.; Schmid, V.; Link, H.: Dioxin- und PAK-Konzentrationen in Abgas und Aschen von Stückholzfeuerungen. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (BayStMLU) (Hrsg.), München 1998, Reihe Materialien 142, 149 S.

/5-7/ Launhardt, T. Umweltrelevante Einflüsse bei der thermischen Nutzung fester Biomasse in Kleinanlagen – Schadstoffemissionen, Aschequalität und Wirkungsgrad. Dissertation am Lehrstuhl für Landtechnik der Technischen Universität München, Juli 2002, Eigenverlag, 195 .

/5-8/ Neuenschwander, P.; Good, J.; Nussbaumer, T.: Grundlagen der Abgaskondensation; Bundesamt für Energie, Bern, 1998

/6-1/ Bosy, B.; Doschko, W.; Helbig, K.; Hubrich, K.-D.; Rothenfelder, F.: Zentralheizungs- und Lüftungsbau. Verlag Gehlen, Bad Homburg, 2000; 428 S.

/6-2/ Brunner GmbH, D-84307 Eggenfelden (Firmenunterlagen)

/6-3/ Centrale Marketinggesellschaft der deutschen Agrarwirtschaft (Hrsg.): Holz als Energierohstoff; CMA, Eigenverlag, Bonn, 1988, 2. Auflage

/6-4/ Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.): DIN 18 880 (Teil 1 und 2: Dauerbrandherde für feste Brennstoffe), Beuth, Berlin, 1991.

/6-5/ Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.): DIN 18 882 (Heizungsherde für feste Brennstoffe), Beuth, Berlin, 1988, 16 S.

/6-6/ Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.): DIN 18 890 (Teil 1 und 2 (Entwurf): Dauerbrandöfen für feste Brennstoffe – Verfeuerung von Scheitholz), Beuth, Berlin, 1990.

/6-7/ Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.): DIN 4702 (Teil 1: Heizkessel – Begriffe, Anforderungen, Prüfung, Kennzeichnung); Beuth, Berlin, 1990, 25 S.

/6-8/ Deutsches Institut für Normung (Hrsg.): DIN 51705 (Prüfung fester Brennstoffe - Bestimmung der Schüttdichte); Beuth, Berlin, 1979

/6-9/ Deutsches Institut für Normung (Hrsg.): DIN 51 730 (Prüfung fester Brennstoffe – Bestimmung des Ascheschmelzverhaltens); Beuth, Berlin, 1984

/6-10/ Deutsches Institut für Normung (Hrsg.): DIN 18 160 (Teil 1: Hausschornsteine, Anforderungen, Planung und Ausführung). Beuth Verlag, Berlin, 2001

/6-11/ Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V., Technisches Regelwerk 551/2

/6-12/ Ebert, H.-P.: Heizen mit Holz in allen Ofenarten. Ökobuch Verlag, Freiburg 1998 (6. Aufl.), 133 S.

/6-13/ FNR (Hrsg.): Leitfaden Bioenergie – Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR), Gülzow, 2000

/6-14/ Fröling Heizkessel- und Behälterbau GmbH, Industriestraße 12, A-4710 Grieskirchen (Firmenunterlagen)
/6-15/ Gaderer, M.: Kleinst-Nahwärmenetze und Mikronetze In Biowärme – Energie aus Holz, Schulungsunterlagen. Bayerisches Zentrum für angewandte Energieforschung (ZAE), Garching, Eigenverlag 2002
/6-16/ Good, J.; Nussbaumer, T.: Regelung einer Stückholzfeuerung mit unterem Abbrand, Bundesamt für Energiewirtschaft, Zürich 1993
/6-17/ Guntamatic Heiztechnik GmbH, Bruck-Waasen 7, A-4722 Peuerbach (Firmenunterlagen)
/6-18/ Hartmann, H.: Analyse und Bewertung der Systeme zur Hochdruckverdichtung von Halmgut; Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (Hrsg.), Eigenverlag, München, 1996, Reihe „Gelbes Heft" 60
/6-19/ Hartmann, H.: Feuerungsanlagen für biogene Festbrennstoffe: Bedeutung der Bauarten und ihre Entwicklung im Markt. Wärmetechnik 41 (4), 1996, S. 209-211
/6-20/ Hartmann, H.; Madeker, U.: Der Handel mit biogenen Festbrennstoffen - Anbieter, Absatzmengen, Qualitäten, Service, Preise. Landtechnik Bericht Nr. 28, Landtechnik Weihenstephan (Hrsg.), Eigenverlag, Freising, 1997, 65 S.
/6-21/ Hartmann, H.; Launhardt, T.; Schmid, H. (1997): Technische Möglichkeiten und umweltrelevante Auswirkungen der Kombination von Holz- und Gasfeuerungen kleinerer Leistung. Forschungsbericht Nr. 1, Eigenverlag Landtechnik Weihenstephan (Hrsg.), Freising, 76 S.
/6-22/ Hartmann, H.; Böhm, T., Maier, L.: Naturbelassene biogene Festbrennstoffe – Umweltrelevante Eigenschaften und Einflussmöglichkeiten. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (Hrsg.), München, 2000, Reihe „Materialien", Nr. 154, 155 S.
/6-23/ Hartmann, H.: Die energetische Nutzung von Stroh und strohähnlichen Brennstoffen in Kleinanlagen. In: Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe (Hrsg.): Tagungsband „Energetische Nutzung von Stroh, Ganzpflanzengetreide und weiterer halmgutartiger Biomasse", Gülzower Fachgespräche, Band 17, Gülzow 2001; S. 62-84.
/6-24/ Hartmann, H., Nussbaumer, T.: Handbeschickte Feuerungen und Pelletöfen. In: Kaltschmitt, M.; Hartmann, H. (Hrsg.): Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren. Springer Verlag, Berlin, 2001, S. 323-345
/6-25/ Hartmann, H.: Wärmeübertrager. In: Kaltschmitt, M.; Hartmann, H. (Hrsg.): Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren. Springer Verlag, Berlin, 2001, S. 363-366
/6-26/ Heizomat Gerätebau GmbH, Maicha 21, 91710 Gunzenhausen (Firmenunterlagen)
/6-27/ Herlt, An den Buchen, D-17194 Vielist (Firmenunterlagen)
/6-28/ Herz Feuerungstechnik GmbH, Sebersdorf 138, A-8272 Sebersdorf (Firmenunterlagen)
/6-29/ HOBAG Brienz AG, Lauenenstraße 51, CH-3855 Brienz
/6-30/ Kahmann und Ellerbrock, Technischer Großhandel, Feldstraße 60, D-33609 Bielefeld (Firmenunterlagen)
/6-31/ Kaltschmitt, M; Hartmann, H. (Hrsg.): Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren. Springer Verlag, Berlin, 2001, 770 S.
/6-32/ KSW Kachelofen GmbH, D-95666 Mitterteich (Firmenunterlagen)
/6-33/ Launhardt, T.; Hurm, R.; Pontius, P.; Strehler, A.; Meiering, A.: Prüfung des Emissionsverhaltens von Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (Hrsg.), Eigenverlag, München, 1994, Reihe Materialien, Nr. 109, 198 S
/6-34/ Launhardt, T.: Erfahrungen mit Klein-Holzfeuerungen in Prüfstandsmessungen und Ansätze zur Optimierung von Feuerungstechnik und Betrieb. In: Nussbaumer T.; Gaegauf, C.; Völlmin, C. (Hrsg.): 3. Kolloquium Klein-Holzfeuerungen am 20. Nov. 1998 in Klus/Schweiz. Eigenverlag 1998, S. 17-35
/6-35/ Launhardt, T.; Hurm, R.; Schmid, V.; Link, H.: Dioxin- und PAK-Konzentrationen in Abgas und Aschen von Stückholzfeuerungen. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (BaySt-MLU) (Hrsg.), München 1998, Reihe „Materialien" 142, 149 S.
/6-36/ Launhardt, T.; Hartmann, H.; Link, H.; Schmid, V.: Verbrennungsversuche mit naturbelassenen biogenen Festbrennstoffen in einer Kleinfeuerungsanlage – Emissionen und Aschequalität. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (Hrsg.), München, 2000, Reihe „Materialien", Nr. 156, 133 S.
/6-37/ Marutzky, R.: Moderne Holzfeuerungsanlagen. Centrale Marketinggesellschaft der deutschen Agrarwirtschaft (Hrsg.), Eigenverlag, Bonn, 1993
/6-38/ Mattsson, J.E.: Basic Handling Characteristics of Wood Fuel: Angle of Repose, Friction Against Surfaces and Tendency to Bridge Building for Different Assortments. Scand. J. For. Res. 1990, 5, S.583-597
/6-39/ Noger, D.; Pletscher, E.: Brennstoffkriminalität – Schnelltest. In: Siebtes Symposium Biobrennstoffe und umweltfreundliche Energietechnik, November 1998; OTTI-Technologie Kolleg, Eigenverlag, Regensburg, 1998, S. 173-180
/6-40/ Nussbaumer, T., Hartmann, H.: Automatisch beschickte Feuerungen. In: Kaltschmitt, M.; Hartmann, H. (Hrsg.): Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren. Springer Verlag, Berlin, 2001, S. 345-363
/6-41/ Nussbaumer, T., Good, J.: Regelung. In: Kaltschmitt, M.; Hartmann, H. (Hrsg.): Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren (Kapitel Feuerungsanlagentechnik). Springer Verlag, Berlin, 2001, S. 366-374
/6-42/ Obernberger, I.; Hammerschmid, A.: Dezentrale Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungstechnologien –- Potential, Einsatzgebiete, technische und wirtschaftliche Bewertung. Schriftenreihe Thermische Biomassenutzung (4). dbv-Verlag, Graz, 1999, 299 S.

/6-43/ Obernberger, I.: Nutzung fester Biomasse in Verbrennungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung des Verhaltens aschebildender Elemente; dbv, Graz, 1997

/6-44/ ÖkoFen GmbH, Mühlgasse, A-4132 Lembach 9 (Firmenunterlagen)

/6-45/ Ökotherm-Projekt GmbH, August-Bebel-Straße 24e, D-09453 Scharfenstein (Firmenunterlagen)

/6-46/ Österreichisches Normungsinstitut (Hrsg.): ÖNORM M7132 (Energiewirtschaftliche Nutzung von Holz und Rinde als Brennstoff – Begriffsbestimmungen und brennstofftechnologische Merkmale); Eigenverlag, Wien, 1998

/6-47/ Pfestorf, K.H. Kachelöfen und Kamine handwerksgerecht gebaut. Verlag Bauwesen, Berlin, 2000, 5. Aufl.; 272 S.

/6-48/ Reber, W.: Kaminöfen (Teil I und II). Kachelofen und Kamin (2001); 18 (Heft 9 und 11) S. 16-26 bzw. 28-38

/6-49/ Schmitz-Günther, T. (Hrsg.): Lebensräume – Der große Ratgeber für ökologisches Bauen und Wohnen. Könemann Verlagsgesellschaft mbH, Köln, 1998, 479 S.

/6-50/ Schramek, E.-R. (Hrsg.): Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik („Reknagel-Sprenger-Schramek"). R. Oldenbourg Verlag, München, 69. Aufl. (1999), 2010 S.

/6-51/ Strehler, A.: Wärme aus Holz und Stroh. DLG Arbeitsunterlagen, Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft e.V. (Hrsg.), Frankfurt, Eigenverlag, 1996, 80 S.

/6-52/ Spliethoff, H.; Siegle, V.; Hein, K.R.G.: Erforderliche Eigenschaften holz- und halmgutartiger Biomasse bei einer Zufeuerung in existierenden Kraftwerksanlagen; Tagung „Biomasse als Festbrennstoff – Anforderungen, Einflussmöglichkeiten, Normung", Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe" Band 6, Landwirtschaftsverlag, Münster, 1996, S. 155-175

/6-53/ Strehler, A.: Informationen zu Wärmegewinnung aus Biomasse – Sammelmappe zu den regelmäßigen Beratungsveranstaltungen an der Bayerischen Landesanstalt für Landtechnik, Eigenverlag, überarbeitete Auflage, Juni 2002

/6-54/ Tiba-Müller (Hrsg.): Firmenunterlagen; Tiba-Müller AG; Bubendorf, Schweiz

/6-55/ Uth, J. Scheitholzvergaserkessel. Broschüre der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe FNR (Hrsg.), Gülzow (2000), 2. Auflage, 52 S.

/6-56/ VDI Richtlinie 2067, Blatt 6: Berechnung der Kosten von Wärmeversorgungsanlagen (Oktober 1986), VDI-Verlag, Düsseldorf

/6-57/ Verordnung über Allgemeine Bedingungen für die Versorgung mit Fernwärme, Bundesgesetzblatt, Ausgabe 19. Januar 1989

/6-58/ Wärme GmbH Berlin, Postfach 610318, D-10925 Berlin, http://www.apliq.de/contracting

/6-59/ Wodtke GmbH, Rittweg 55-57, D-72170 Tübingen (Firmenunterlagen)

/7-1/ BLT Wieselburg, schriftliche Mitteilung (Herr Lasselsberger, Herr Baumgartner), Bundesanstalt für Landtechnik, Rottenhauser Straße 1, A-3250 Wieselburg, Österreich

/7-2/ Hartmann, H.; Schneider, S.: Ökologische Analyse: Energetische Umwandlung (Festbrennstoffe). In: Hartmann, H.; Kaltschmitt, M. (Hrsg.): Biomasse als erneuerbarer Energieträger – Eine technische, ökologische und ökonomische Analyse im Kontext der übrigen Erneuerbaren Energien. Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe", Band 3 (Neubearbeitung), Landwirtschaftsverlag, Münster-Hiltrup, 2002, 692 S..

/7-3/ Hartmann, H.; Launhardt, T.; Schmid, H.: Technische Möglichkeiten und umweltrelevante Auswirkungen der Kombination von Holz- und Gasfeuerungen kleinerer Leistung. Forschungsbericht Nr. 1, Eigenverlag Landtechnik Weihenstephan (Hrsg.), Freising, 1997, 76 S.

/7-4/ Launhardt, T.; Hurm, R.; Pontius, P.; Strehler, A.; Meiering, A.: Prüfung des Emissionsverhaltens von Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (Hrsg.), Eigenverlag, München, 1994, Reihe Materialien, Nr. 109, 198 S

/7-5/ Launhardt, T.; Hurm, R.; Schmid, V.; Link, H.: Dioxin- und PAK-Konzentrationen in Abgas und Aschen von Stückholzfeuerungen. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (BayStMLU) (Hrsg.), München 1998, Reihe „Materialien" 142, 149 S.

/7-6/ Launhardt, T.; Hartmann, H.; Link, H.; Schmid, V.: Verbrennungsversuche mit naturbelassenen biogenen Festbrennstoffen in einer Kleinfeuerungsanlage – Emissionen und Aschequalität. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (Hrsg.), München, 2000, Reihe „Materialien", Nr. 156, 133 S.

/7-7/ Launhardt, T.; Hartmann, H.; Link, H.: Emissionsmessungen an 21 bayerischen Zentralheizungsanlagen für Holzhackgut. Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (Hrsg.), München 1999, Reihe „Gelbes Heft", Nr. 65, 39 S.

/7-8/ Obernberger, I.: Aschen und deren Verwertung. In: Kaltschmitt, M.; Hartmann, H. (Hrsg.): Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren. Springer Verlag, Berlin, 2001, S. 413-426

/7-9/ Pischinger, F.; Sterlepper, J.; Ogrzewalla, J.: Studie: Emissionsvergleich „HEL und Erdgas" – Vergleich der Schadstoffemissionen bei der Verbrennung von Erdgas bzw. leichtem Heizöl in Wärmeerzeugern. Wärmetechnik 39, Hefte Nr. 3,4,5,6,7 (1994), S.150-154; 215-218; 276-282; 310-314; 369-373.

/8-1/ ARGE Bau: Musterbauordnung (MBO). Fassung von Dezember 1997

/8-2/ BMWI: Richtlinien zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien vom 23. März 2001, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWI), Berlin

/8-3/ BMU: Verordnung über die Entsorgung von Altholz (Entwurf, Stand 20.9.2000), Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Bonn.

/8-4/ BMU: Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft), Novellierte Fassung vom 24. Juli 2002, Inkrafttreten: 1. Okt. 2002, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Bonn.

/8-5/ Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.): DIN 51731 (Prüfung fester Brennstoffe – Presslinge aus naturbelassenem Holz - Anforderungen und Prüfung), Beuth Verlag, Berlin, 1996

/8-6/ Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.): DIN 4705 (Teil 1 – Feuerungstechnische Berechnung von Schornsteinabmessungen; Begriffe, ausführliches Berechnungsverfahren). Beuth Verlag, Berlin, 1993

/8-7/ Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.): DIN 18 160 (Teil 1 – Hausschornsteine, Anforderungen, Planung und Ausführung). Beuth Verlag, Berlin, 2001

/8-8/ Deutsches Institut für Normung (Hrsg.): DIN EN 303-5 (Teil 5 – Heizkessel für feste Brennstoffe, hand- und automatisch beschickte Feuerungen, Nenn-Wärmeleistungen bis 300 kW; Begriffe, Anforderungen, Prüfungen und Kennzeichnung). Beuth Verlag, Berlin, 1999, 28 S.

/8-9/ Deutsches Institut für Normung (Hrsg.): Entwurf zur DIN 18894 (Feuerstätten für feste Brennstoffe – Raumheizer für Holzpellets – Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung), noch unveröffentlicht.

/8-10/ Feldhaus, G.; Hansel, H.D. (Bearb.): Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG); C.F. Müller, Heidelberg, 1997, 11. Auflage, 646 S

/8-11/ FeuV: Muster einer Feuerungsverordnung (M-FeuVO) der Fachkommission Bauaufsicht der ARGE Bau vom 24. Februar 1995, geändert am 18.Sept 1997. bzw. Verordnung über Feuerungsanlagen, Wärme- und Brennstoffversorgungsanlagen (Feuerungsverordnung), hier am Beispiel der bayerischen Fassung vom 6. März 1998 (GVBl. S. 112).

/8-12/ KÜO: Verordnung über das Kehren und Überprüfen von Feuerungs- und Lüftungsanlagen – Kehr- und Überprüfungsordnung (KÜO), vom 18. Dezember 1997. Kommentierte Fassung, Landesinnungsverband für das Bayerische Kaminkehrerhandwerk (Hrsg.), 1998, 44 S.

/8-13/ KÜGebO: Verordnung über die Gebühren und Auslagen der Bezirkskaminkehrermeister – Kehr- und Überprüfungsgebührenordnung (KÜGebO) vom 18. Dez. 1997. Kommentierte Fassung, Landesinnungsverband für das Bayerische Kaminkehrerhandwerk (Hrsg.), 1998; 47 S.

/8-14/ Lasselsberger, L.: Kleinfeuerungen für Holz – Verbrennungstechnik/Stand der Technik/Regelwerke/Entwicklung. Bundeanstalt für Landtechnik (BLT), A-3250 Wieselburg, Österreich

/8-15/ ÖNORM M 7135: Presslinge aus naturbelassenem Holz und naturbelassener Rinde – Pellets und Briketts, Anforderungen und Prüfbestimmungen. Österreichisches Normungsinstitut (Hrsg.), Wien, Österreich, 2000, 10 S.

/8-16/ Schornsteinfegergesetz (SchfG): Gesetz über das Schornsteinfegerwesen von 1969, BGBl I S. 1634, 2432

/8-17/ Steiglechner, J. (TÜV Süddeutschland): Zertifizierung und sicherheitstechnische Prüfungen bei Holzheizkesseln. In Biowärme – Energie aus Holz, Schulungsunterlagen. Bayerisches Zentrum für angewandte Energieforschung (ZAE), Garching, Eigenverlag 2001

/8-18/ Verein zur Förderung von Maßnahmen für Feuersicherheit und Umweltschutz des Schornsteinfegerhandwerks e.V. (Hrsg.): Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes – Verordnung über Kleinfeuerungsanlagen, 1.BImSchV (kommentierte Fassung). Essen (ohne Datum); 116 S.

/9-1/ Brusche, R.: Hackschnitzel aus Schwachholz. KTBL Schrift 290, Landwirtschaftsverlag, Münster, 1983

/9-2/ Hartmann, H.; Madeker, U.: Der Handel mit biogenen Festbrennstoffen – Anbieter, Absatzmengen, Qualitäten, Service, Preise. Landtechnik Bericht Nr. 28, Landtechnik Weihenstephan (Hrsg.), Eigenverlag, 1997, Freising, 65 S.

/9-3/ Hartmann, H.: Kosten der Energiegewinnung aus Biomasse. In: Hartmann, H.; Kaltschmitt, M. (Hrsg.): Biomasse als erneuerbarer Energieträger – Eine technische, ökologische und ökonomische Analyse im Kontext der übrigen erneuerbaren Energien. Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“, Band 3 (Neubearbeitung), Landwirtschaftsverlag, Münster-Hiltrup, 2002, S. 486-527.

/9-4/ Landesinnungsverbandes für das Bayerische Kaminkehrerhandwerk, München (Herr H. Wazula)

/9-5/ Remler, N.; Fischer, M.: Kosten und Leistung bei der Bereitstellung von Waldhackschnitzeln. Bericht der Bayerischen Landesanstalt für Wald- und Forstwirtschaft (LWF) für das Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (Hrsg.), Heft-Nr. 11, München, 1996

/9-6/ Stratman, R.: ZMP-Bilanz Getreide: Ölsaaten – Futtermittel 2001. Zentrale Markt- und Preisberichtstelle GmbH (ZMP) (Hrsg.), Bonn, Eigenverlag, 238 S.

/9-7/ VDI-Gesellschaft Technische Gebäudeausrüstung: VDI-Richtlinie 2067, Blatt 1: Berechnung der Kosten von Wärmeversorgungsanlagen – Betriebtechnische und wirtschaftliche Grundlagen. Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.), Beuth Verlag, Berlin, 1983

/10-1/ ASG-Analytik-Service Gesellschaft mbH Feldstraße 16-20, 86156 Augsburg

/10-2/ Bayerische Bauordnung (BayBO), Fassung vom 4. August 1997 (GVBl. S. 434; ber. 1998 S. 270, 1998 S. 439; 1999 S. 521, 532)

/10-3/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts – Wasserhaushaltsgesetz (WHG). BGBl. I Nr. 57 vom 28.08.1998, S. 2455 ff

/10-4/ Deutsches Institut für Normung (Hrsg.): prEN 14 214: Kraftstoffe für Kraftfahrzeuge – Fettsäure-Methylester (FAME) für Dieselmotoren – Anforderungen und Prüfverfahren. Beuth, Berlin, 2001

/10-5/ Elsbett, K.; Elsbett, L.; Elsbett, G.; Behrens, M.: The Duothermic Combustion for D.I. Diesel Engines; SAE Technical Paper Series (860310), S. 13-17, 1986

/10-6/ Gailfuß, M.: BHKW-Infozentrum: http://www.bhkw-infozentrum.de/

/10-7/ Gesetz zum Einstieg in die ökologische Steuerreform vom 24. März 1999 (BGBl. I, Nr. 14, S.378-384)

/10-8/ Gesetz zur Fortführung der ökologischen Steuerreform vom 16. Dezember 1999 (BGBl. I, Nr. 56 S.2432-2440)

/10-9/ Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG) vom 1.4.2000 (BGBl. I, Nr. 13, S.305-309)

/10-10/ Hartmann, H.; Kaltschmitt, M. (Hrsg.): Biomasse als erneuerbarer Energieträger – Eine technische, ökologische und ökonomische Analyse im Kontext der übrigen erneuerbaren Energien. Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe", Band 3 (Neubearbeitung), Landwirtschaftsverlag, Münster-Hiltrup, 2002, 692 S.

/10-11/ Klien, J.: Praxis Kraft-Wärme-Koppplung – Planungshilfe Blockheizkraftwerke, Bd. 3. Verlag C.F. Müller, Karlsruhe, 1991, 158 S.

/10-12/ Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL): Dezentrale Ölsaatenverarbeitung – Landwirtschaftsverlag, Münster, 1999, 130 S., Arbeitspapier 267

/10-13/ Mineralölsteuergesetz (MinöStG) vom 21. Dezember 1992 (BGBl. I S. 2150, 2185) (BGBl. III 612-14-20)

/10-14/ Mollenhauer, K. (1997): Handbuch Dieselmotoren. Springer-Verlag, Berlin, 1029 S.

/10-15/ Ortmaier, E.: Betriebswirtschaftliche Aspekte von Blockheizkraftwerken auf Pflanzenölbasis. In: VDI-Gesellschaft Energietechnik (Hrsg.): Pflanzenöle als Kraftstoffe für Fahrzeugmotoren und Blockheizkraftwerke; VDI-Berichte 1126, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1994, S. 239-252

/10-16/ Remmele, E., Thuneke, K., Widmann, B., Wilharm, T.; Schön H.: Begleitforschung zur Standardisierung von Rapsöl als Kraftstoff für pflanzenöltaugliche Dieselmotoren in Fahrzeugen und BHKW. Abschlussbericht für das Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten; Landtechnik Weihenstephan (Hrsg.) für das Bayerische Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten (Hrsg.), München, 2000, Reihe „Gelbes Heft", Nr. 69.

/10-17/ Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm - TA Lärm) Vom 26. August 1998 (GMBl. 1998 S. 503)

/10-18/ Thuneke, K.: Emissionen Rapsöl betriebener Dieselmotoren. Landtechnik 54 (1999), Nr. 3, S. 176-177

/10-19/ Thuneke, K.; Kern, C.: Pflanzenölbetriebene Blockheizkraftwerke – Teil I. Forschungsbericht der Bayerischen Landesanstalt für Landtechnik, Freising, für das Bayerische Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (Hrsg.), München, 2002, Reihe „Materialien", Nr. 171.

/10-20/ Thuneke, K.; Widmann, B.; Schön, H.: Betriebs- und Emissionsverhalten von Pflanzenöl-BHKW. In: OTTI-Energie-Kolleg (Hrsg.): Zehntes Symposium „Energie aus Biomasse – Biogas, Pflanzenöl, Festbrennstoffe". Eigenverlag, Regensburg, 2001, S. 253-258

/10-21/ Thuneke, K., Link, H.; Widmann, B.; Remmele, E.: Pflanzenölbetriebene Blockheizkraftwerke – Abschlussbericht. Forschungsbericht der Bayerischen Landesanstalt für Landtechnik, Freising, für das Bayerische Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (Hrsg.), München, 2002, Reihe „Materialien", Nr. 175.

/10-22/ Thuneke, K., Widmann, B.: Operation and emission characteristics of CHP units, fuelled with rapeseed oil. Proceedings of the 12th European Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection. 17-21 June, Amsterdam, 2002, pp. 703-705.

/10-23/ VDI-Gesellschaft Energietechnik: VDI Richtlinie 3985 (Entwurf): Grundsätze für Planung, Ausführung und Abnahme von Kraft-Wärme-Kopplung mit Verbrennungskraftmaschinen. Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.), Beuth Verlag, Berlin, 1996

/10-24/ VDI-Gesellschaft Technische Gebäudeausrüstung: VDI-Richtlinie 2067, Blatt 7: Berechnung der Kosten von Wärmeversorgungsanlagen – Blockheizkraftwerke. Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.), Beuth Verlag, Berlin, 1988

/10-25/ VDI-Gesellschaft Energietechnik (Hrsg.): Rationelle Energieversorgung mit Verbrennungs-Motoren-Anlagen, Teil II: BHKW-Technik. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, VDI-Verlag, 1991, 44 S.

/10-26/ VbF: Verordnung über Anlagen zur Lagerung, Abfüllung und Beförderung brennbarer Flüssigkeiten zu Lande (Verordnung über brennbare Flüssigkeiten – VbF) vom 27.10.1980 in der Fassung vom 19.12.1996. BGBl. I S. 1914 ff

/10-27/ Verordnung zur Durchführung des Mineralölsteuergesetzes (Mineralölsteuer-Durchführungsverordnung – MinöStV) vom 15. September 1993 (BGBl. I S. 1692) (BGBl. III 612-14-20-1)

/10-28/ Widmann, B.; Stelzer, T.; Remmele, E.; Kaltschmitt, M.: Produktion und Nutzung von Pflanzenölkraftstoffen. In: Kaltschmitt, M.; Hartmann, H. (Hrsg.): Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren. Springer Verlag, Berlin, 2001, S. 537-584

/10-29/ Zell, B., Bayerisches Landesamt für Umweltschutz „Emissionsauflagen und Genehmigungspraxis bei Biogas- und Pflanzenöl-BHKW", Zweites Anwenderforum Energetische Nutzung von Pflanzenöl und Biogas; Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (OTTI) Regensburg; 23. November 2000 in Kloster Banz, Staffelstein

Anhang

Anhang A Bauarten von Kreissägen, Holzspaltern und Schneid-Spaltgeräten

Anhang B Bauarten von mobilen Holzhackern

Anhang C Bauarten von Einzelfeuerstätten für Holzbrennstoffe

Anhang D Bauarten von Zentralheizungskesseln für Festbrennstoffe (Kleinanlagen)

Anhang E Adressenlisten zu den Herstellerverzeichnissen in Anhang A bis D und zum Thema Pflanzenöl

Anhang F Informationsstellen für öffentliche Fördermaßnahmen

Anhang G Weiterführende Literatur (Bücher und andere Quellen)

Anhang H Energieeinheiten und Umrechnungsfaktoren

Anhang I Faktoren (F) zur Umrechnung von normierten Massenkonzentrationen auf energiemengenbezogene Emissionen

Anhang J Faktoren (F) zur Umrechnung von Emissionsangaben bei unterschiedlichem Bezugssauerstoffgehalt

Hinweis: Die nachfolgenden Listen beruhen auf Herstellerangaben (Stand: ca. Mai 2002). Sie erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit und stellen weder eine Empfehlung noch einen Leistungsausweis dar.

Anhang A: Bauarten von Kreissägen, Holzspaltern und Schneid-Spaltgeräten (zu den Adressen und Kontaktmöglichkeit siehe Adressenliste in Anhang E)

Hersteller/ Fabrikat	Sägen				Holzspalter							Schneid-Spaltgeräte					
					Spalten					geeignete Holzlänge		Schneiden				Spalten	
	Wippkreissäge	Wipptischkreis-säge	Rolltischkreis-säge	Bandsägen	hydraulisch	Horizontal	Vertikal	Mechanisch	Kegelspalter	50 cm	100 cm	Kreissäge	Kettensäge	Messer hydr.	Messer mech.	hydraulisch	mechanisch
AL-KO	x																
Ammboss					x		x			x	x						
AMR					x		x										
ARU					x		x										
BGU	x	x			x		x			x	x	x			x	x	x
Barioli Lucio					x	x											
Bell					x	x											
Binderberger	x				x	x	x			x	x	x				x	
Boschert				x	x		x			x	x						
Briol					x	x				x	x						
Brune												x				x	
Bugnot					x		x										
Carmec/Einhell					x		x										
Diemer	x				x	x											
Diezinger	x																
Eder					x						x						
Elektra Beckum	x				x		x										
Geba					x		x										
Grube / Kaheli	x		x		x	x	x	x	x	x	x						
Güde		x															
Hejo												x				x	
Herrmann	x																
Hertlein	x																
HMG		x			x		x			x	x						
HVG			x														
Igland														x		x	
Japa	x				x	x		x	x		x		x			x	
Kienesberger		x															
Kisa													x			x	
Kloster	x		x														
Kretzer	x				x	x	x			x	x	x				x	
KUBE								x	x		x						
MHR / Pezzolato	x	x	x	x	x	x	x			x	x	x				x	
Miltec					x		x			x	x	x				x	
Nagel			x														
Oehler					x	x	x			x	x						
Palax												x				x	
Pezzolato												x				x	
Pinosa												x				x	
Posch	x		x		x	x	x			x	x	x				x	
Prader					x		x					x				x	
Rabaud					x		x			x	x						
S+R					x	x					x						
Scheppach	x		x		x		x			x	x						
Stockmann					x		x										
Teräs	x											x				x	
Trautmann					x		x										
Trejon													x			x	
Vogesenblitz					x	x	x			x	x						
Woodline					x	x	x										
Zoma					x	x											

Anhang B: Bauarten von mobilen Holzhackern
(zu den Adressen und Kontaktmöglichkeit siehe Adressenliste in Anhang E)

Fabrikat / Hersteller	Anbau bzw. Aufbau					Antrieb		Hackwerkzeug			Einzug	
	3-Punktanbau	Frontanbau	Fahrwerk	Aufbau	Selbstfahrer	Zapfwelle	Aufbaumotor	Scheibe	Trommel	Schnecke	Walzen	Stahlgliederband
Berkili	x		x			x	x	x			x	
BGU	x					x		x			x	
Bruks	x		x	x		x	x		x		x	x
Cramer	x		x			x	x	x			x	
Dücker	x	x	x			x	x	x			x	
Erjo				x			x		x		x	
Eschlböck	x		x			x	x	x	x		x	x
Farmi	x					x		x			x	
Heizohack	x		x			x	x		x		x	
Husmann	x	x	x			x	x	x			x	
JBM	x		x			x	x	x				
Jensen-Angeln	x	x	x			x	x	x	x		x	x
Jenz	x		x			x	x		x		x	x
Junkkari	x		x			x	x	x			x	
Klöckner			x			x	x		x		x	
Korn Umwelttechnik			x	x		x	x		x			x
Laimet	x		x			x	x			x		
Longset				x			x		x		x	
Matec			x	x			x		x		x	x
MUS-MAX			x			x	x		x		x	x
Pezzolato	x		x			x	x	x			x	
Posch	x		x			x	x	x	x		x	x
Pöttinger	x		x			x	x	x			x	
Rudnik + Enners				x			x		x			x
Schliesing	x	x	x			x	x	x			x	
Starchl	x		x	x		x	x		x			x
TP Lindana	x		x		x		x		x		x	
Tünnißen	x	x	x			x	x	x			x	
UTC	x				x		x		x		x	x
Vogt	x		x			x	x	x				
Weiss	x		x			x	x		x			x
Wellnik	x			x		x	x		x		x	x

Anhang C: Bauarten von Einzelfeuerstätten für Holzbrennstoffe (zu den Adressen und Kontaktmöglichkeit siehe Adressliste in Anhang E)

Anbieter	Offene Kamine						Kamineinsätze						Kachelofen-einsätze				
	Aussenbereich	Innenbereich	Fertigkamine	Kaminöfen	Specksteinöfen	Pelletöfen	aus Beton/feuerfest	aus Schamotte	aus Gusseisen	aus Stahl	mit Türen	mit Wassertaschen	Holz	Pellets	mit Wasserteil	Kachelgrundöfen	Warmluftöfen
Accent Kamine		x		x													
Antike Kachelöfen																x	
Attika Feuerkultur	x				x												
Austroflamm		x	x	x	x			x	x	x	x						
Bachmann	x	x	x	x	x											x	
Blank				x	x					x	x		x		x		
Boley		x	x	x	x					x	x		x		x		
Brombacher Keramik	x		x										x	x	x	x	x
Brunner		x		x				x	x		x	x	x		x	x	x
Buderus				x					x		x	x	x				x
Calimax				x		x											
Camina	x	x	x	x				x		x		x	x		x		
Caminetti	x	x							x		x						
Cera		x	x	x					x	x	x		x		x		
Creatherm		x		x		x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Cronspisen													x			x	
Dan-Skan				x									x				
Denk	x	x					x	x	x	x	x		x		x	x	x
Dovre				x				x	x		x						
Ebinger	x	x		x												x	x
Energetec		x		x						x	x		x				
Form-TEQ	x	x	x	x												x	x
Ganz		x		x						x	x					x	x
Gerco				x	x					x	x	x	x		x		
Glöckel & Ruckwid		x														x	x
Grotherm				x				x					x				x
Gutbrod Keramik		x															x
Haas & Sohn				x									x				
Hagos	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Harbeck				x													
Hark	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Hase	x	x														x	x
Heinrichs	x	x														x	x
Hilpert	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x		x	x	x
HWAM				x						x			x				
Iversen				x	x						x						
Jasba		x														x	x
Jydepejsen A/S				x	x												
Kago	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Kaminfeuer direkt				x													
Kaschütz													x		x		x
Keramik Art	x	x		x												x	x

Anhang C: Bauarten von Einzelfeuerstätten für Holzbrennstoffe (zu den Adressen und Kontaktmöglichkeit siehe Adressliste in Anhang E) (Forts.)

Anbieter	Offene Kamine						Kamineinsätze						Kachelofen-einsätze				
	Aussenbereich	Innenbereich	Fertigkamine	Kaminöfen	Specksteinöfen	Pelletöfen	aus Beton/feuerfest	aus Schamotte	aus Gusseisen	aus Stahl	mit Türen	mit Wassertaschen	Holz	Pellets	mit Wasserteil	Kachelgrundöfen	Warmluftöfen
Klass	x	x	x	x						x						x	x
Koppe			x	x	x								x				
Kretzschmar	x	x														x	x
KSW					x												
KVK				x	x			x			x						
Lechnerhof		x														x	x
Leda		x		x					x		x	x	x		x	x	x
Märchenofen				x	x				x								
Marggraf	x	x		x				x	x	x	x	x	x		x	x	
Matten	x	x	x	x						x							
MEZ				x													
Morsø				x	x				x		x		x				
Mylin	x	x			x												
Nibe				x	x					x	x					x	
Nunna Uuni					x												
Olsberg		x		x	x			x	x	x	x		x				
Openfire Rösler	x	x	x	x				x	x		x		x			x	x
Oranier			x	x						x	x	x					x
Poli Keramik																x	x
Rembserhof	x	x														x	x
Rink				x												x	x
Scanfire				x													
Schätzle	x	x		x		x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x
Schipp	x	x						x	x	x	x	x			x	x	x
Schmid				x				x	x	x	x		x		x		x
Scholl	x	x											x			x	x
Sommerhuber		x														x	x
Spartherm	x	x	x	x				x		x	x		x		x		
Stegemann	x	x		x				x	x	x	x		x			x	x
Superfire				x												x	
Supra		x	x	x				x	x	x	x		x				
Tekon		x		x	x					x	x	x	x		x	x	x
Tonangebend	x	x							x	x	x		x			x	x
Tonart	x	x		x						x			x			x	x
Tonwerk Lausen				x													
Tulikivi				x	x												
Wamsler	x	x		x	x	x											
Wanders				x				x	x	x	x		x				
Wodtke	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x		x	x	x	x	x
Wolfshöher Tonwerke													x			x	
Wotan										x	x						
Ziegler		x		x		x		x		x		x	x	x	x	x	x

Anhang D: Bauarten von Zentralheizungskesseln für Festbrennstoffe (Kleinanlagen)
(zu den Adressen und Kontaktmöglichkeit siehe Adresslisten in Anhang E)

Fabrikat / Vertrieb	Nennwärme-Leistungsbereich (kW)	Bauarten/Feuerung								geeignete Brennstoffe					
			Automatisch beschickte Anlagen							Holz			Halmgut		
		Handbeschickt	Pelletfeuerung	Vorofen	Unterschub	Stufenrost	Quereinschub	Vorschubrost	Sonstige	Scheitholz	Hackgut	Pellet	Häckselgut	Ballen	Pellet
ARCA	29-49	x								x					
Atmos	15-50	x								x					
Austroflamm	6-15		x									x			
Axiom	15-23		x							x		x			
Baxi / Föbi	20-50	x								x					
	15-40		x									x			
	23-37						x				x				x
Biogen Heiztechnik	35-120						x				x	x		x	x
Brunner	5-14	x								x					
Buderus	15-52	x								x					
Compello	15		x									x			
Cormall	56-120	x					x						x	x	x
CTC Heizkessel	14,5-35	x								x					
	14,5		x									x			
Dan Trim	25-1750			x							x	x	x		x
De Dietrich	22-54	x								x					
EcoTec	15-25		x			x				x		x			
Eder	15-75	x								x				x	x
	15		x		x							x			
	12-120				x						x				
ELCO Klöckner	20-70	x								x					
Endreß	50-250			x							x	x			x
Enickl	20-120			x						x	x				
Eszmeister	25-350			x						x	x				
ETA	20-60	x								x					
	14,5-30		x									x			
Eurowarm	30-74	x								x					
	20		x									x			
Ferro	27-90	x								x					x
Fischer	15-52	x								x	x				
	15		x							x		x			
Fröling / A	15-50	x								x					
	15-130			x							x				
	28-1000					x	x				x				
Fröling / D	20-60	x								x					
	15-25		x									x			
Gerco	13-30	x								x					
Gerlinger	45-80				x						x				
	15		x									x			
Gilles	15-60		x				x					x			
Graner	22-32	x								x					
	15-25		x							x		x			
Grimm	30-45	x								x					
	15-70						x			x	x	x			
Guntamatic	21-233	x								x					
	15		x									x			
Hager	15-25		x									x			
	25-180				x						x				
Hargassner	15-140				x						x				
	12-45		x				x					x			
HDG Bavaria	12-280	x								x	x			x	x
	200-280			x							x				x
	49-200					x	x				x				
	15-25		x			x						x			
Heitzmann	30-45	x								x					
Heizomat	30-850						x				x				x

Anhang D: Bauarten von Zentralheizungskesseln für Festbrennstoffe (Kleinanlagen)
(zu den Adressen und Kontaktmöglichkeit siehe Adresslisten in Anhang E) (Forts.)

Fabrikat / Vertrieb	Nennwärme-Leistungsbereich (kW)	Bauarten/Feuerung								geeignete Brennstoffe					
			Automatisch beschickte Anlagen							Holz			Halmgut		
		Handbeschickt	Pelletfeuerung	Vorofen	Unterschub	Stufenrost	Quereinschub	Vorschubrost	Sonstige	Scheitholz	Hackgut	Pellet	Häckselgut	Ballen	Pellet
Herlt	35-230 140	x x								x x				x	x
Herz-Feuerungstechnik	12-50 15-150 30-200	x	x		x					x		x			
Hobag	25-110						x			x	x				
Hohmann	25-90	x								x					
Hoval	15-42 15	x	x							x		x			
HT Engineering	10-20		x									x			
Huber	48-300			x						x	x	x			x
KÖB & Schäfer	35-150 75-1000	x			x					x	x	x			
Künzel	15-30 15	x	x							x	x 	 x			
KWB	15-100 10-30		x		x						x	x x			
Limbacher	20-200		x								x				
Lopper	18-800 40-450	x							x	x	x x			x	x
Müller	20-15000				x	x		x			x				
Nolting	45-149 45-2500	x		x	x					x	x x	 x			
Oertli Rohleder	15-40	x								x					
ÖkoFen	20-70 10-32		x		x						x	 x			
Ökotherm	25-45 49-800	x					x			x	x	x	x		x
Palazzetti	10-15		x									x			
Paradigma	15-35		x									x			
Passat	32-140 23-185	x					x			x	x x	 x		x	x x
Perhofer	35-80 22		x	x							x	 x			
Prüller	22-65 20-40 20-60	x	x				x			x	 	 x			
REKA	20-3500				x		x	x			x	x	x	x	x
SBS	15-30	x								x					
Schmid	16-100 20-3000	x			x			x		x	x x	 x			x x
sht	15-50 15-31	x	x							x		 x			
Sommerauer & Lindner	15-25 30-150		x		x						x	x			
Thermostrom	20-70 14	x	x							x		 x			
Unical Kessel	20-43	x								x					
UTC	28-290 40			x			x				x x				
Viessmann	21-40 15	x	x							x		 x			
Windhager	14-40 15	x	x							x		 x			
WVT	30-100 35-2200	x		x		x				x	x			x	x
Zima	40-900	x			x					x	x				

Anhang E: Adressenlisten zu den Herstellerverzeichnissen in Anhang A-D und zum Thema Pflanzenöl

Fabrikat	– Firma, Anschrift, Postleitzahl, Ort – Telefon , Fax, Internet
Kreissägen, Holzspalter und Schneid-Spaltgeräte (Anschriften zu Herstellerverzeichnis in Anhang A):	
AL-KO	AL-KO Kober AG, Postfach 61, 89359 Kötz
Ammboss	Ammboss Holzspalter; W. Irlacher, Schmidstraße 7, 83362 Surberg/Oed Tel.: 0861/14391, Fax: 0861/4857
AMR	AMR Fielenbach HJF Vertrieb, 53408 Much-Hardt 2 Tel.: 02245/3051, Fax: 02245/1021, Internet: www.hjf-vertrieb.de
ARU	ARU-Maschinen Albert Rau, Albershäuser Str. 4, 73066 Uhingen Tel.: 07161/32353, Fax: 07161/35115, Internet: www.aru.de
Barioli Lucio/ Güde	Güde Heimwerkerbedarf Handels-GmbH & Co. KG Birkichstraße 6, 74549 Wolpertshausen.
Bell	Bell s.r.l., Via F. De Pisis, 5, I-42100 Reggio Emilia
BGU	Südharzer Maschinenbau GmbH, Helmestr. 94, 99734 Nordhausen Tel.: 03631/6297106, Fax: 03631/600741
Binderberger	Binderberger Maschinenbau & Handels GmbH Am Fillmannsbach 9, A-5144 St. Georgen am Fillmannsbach Tel. : (+43)7748/8620-0, Fax: (+43)7748/8620-20, Internet: www.binderberger.com
Boschert	Boschert GmbH & Co KG, Mattenstraße 1, 79541 Lörrach-Hauingen Tel.: 07621/5731, Fax: 07621/55184
Briol	Heinz Brinkmann, Auf der Kuhlen 15, 21726 Oldendorf Tel.: 04144/7278, Fax: 04144/7488, Internet: www.briol.de
Brune	Berd Brune, Röthstraße 38, 31840 Hess. Oldendorf, Tel.: 05152/ 1774
Bugnot	Bugnot Deutschland, 06648 Braunsroda Tel.: 034467/21646, Fax: 034467/21646, Internet: www.bugnot.de
Carmec/ Einhell	Hans Einhell AG, Wiesenweg 22, 94405 Landau / Isar
Diemer	Diemer-Automat GmbH, Schillerstraße 67-73, 72458 Albstadt Tel.: 07431/52065, Fax: 07431/4903
Diezinger	Hans Diezinger, Burgweg 3, 91578 Leutershausen - Jochsberg
Eder	Eder-Maschinenbau Schweigerstr. 6, 38302 Wolfenbüttel Tel.: 05331/76046, Fax: 05331/76048, Internet: www.eder-maschinenbau.de
Elektra Beckum	Elektra Beckum Aktiengesellschaft, Daimlerstraße 1, 49716 Meppen
GEBA	GEBA Gerätebau GmbH, Äuleweg 7, A-6714 Nüziders-Vorarlberg
Grube / Kaheli	Grube KG Forstgerätestelle, 29646 Hützel Tel.: 05194/900-0, Fax: 05194/900270
Hejo	Josef Hechenblaickner, Hohlsteinweg 9, A-6230 Brixlegg Tel.: (+43)5337/63243, Fax: (+43)5337/63243
Herrmann	Herrmann, Industriegebiet Herste/B 64, 33014 Bad Driburg / Herste
Hertlein	Hertlein, An der Brücke 2, 91586 Lichtenau
HMG	Hess Maschinen, Dingolfinger Straße 20, 94419 Griesbach b. Reisbach Tel.: 08734/7736, Fax: 08734/1874
HVG	HVG-GmbH, Donaustr. 20, 94491 Hengersberg
Igland	Heiß Forstmaschinen GmbH, Steinbach 9, 83661 Lenggries Tel.: 08042/9149-0, Fax: 08042/914929, www.heiss-forst.de
Japa	Bernd Koch Forsttechnik, Honstetter Straße 11, 78253 Eigeltingen Tel.: 07774/920813, Fax: 07774/920814
Japa	Müller-Habbel MHD-Forsttechnik, Böminghausen 12, 57399 Kirchhundem Tel.: 02723/72524, Fax: 02723/73044, Internet: www.müller-habbel.de
Kienesberger	Kienesberger, Industriezeile 25, A-5280 Braunau a. Inn
Kisa	Hans Seibold Forstmaschinen, Lehrer-Vogel-Weg 24, 83623 Baiernrain Tel.: 08027/7708, Fax: 08027/7317
Kloster	Gert Unterreiner, Fährmannweg 10, 84533 Stammham Tel.: 08678/919931, Fax: 919933, Internet: www.gert-unterreiner.de
Kretzer	Walter Kretzer, Tannenweg 7, 88436 Eberhardzell OT Oberessendorf Tel.: 07355/93190, Fax: 07355/7607, Internet: www.wkretzer.de
KUBE	Kunkel GmbH, Kirstinusstr. 26, 88171 Weiler im Allgäu Tel.: 08387/562, Fax: 08387/3640
MHR/ Pezzolato	Mathias Rau GmbH, Gewerbegebiet, 73110 Hattenhofen Tel.: 07164/9413-0, Fax: 07164/941313, Internet: www.rau-forsttechnik.de

Anhang E: Adressenlisten zu den Herstellerverzeichnissen in Anhang A-D und zum Thema Pflanzenöl (Forts.)

Fabrikat	– Firma, Anschrift, Postleitzahl, Ort – Telefon , Fax, Internet
Miltec	Milde GmbH, Am Weingarten 5, 92274 Gebenbach Tel.: 09622/700620, Fax: 09622/700640
Nagel	Jakob Nagel Maschinenbau GmbH, 89174 Altheim/Alb Tel.: 07340/595
Oehler	Herbert Oehler, Windschlägerstr. 107, 77652 Offenburg-Windschläg Tel.: 0781/9139-0, Fax: 913916, Internet: www.oehlermaschinen.de
Palax	Hans Seibold Forstmaschinen, Lehrer-Vogel-Weg 24, 83623 Baiernrain Tel.: 08027/7708, Fax: 08027/7317
Pezzolato	Huckle Erich Holzbearbeitung, Dorfstraße 10, 88527 Möhringen Tel.: 07371/10261, Fax: 07371/10358
Pinosa	Pinosa srl, Via Udine, I-33017 Tarcento Tel.: (+39)432/783298, Fax: (+39)432/783416, www.pinosa.net
Posch	Posch GmbH, Preysingallee 19, 84149 Velden/Vils Tel.: 08742/2081, Fax: 08742/2083, Internet: www.posch.com
Prader	Prader Maschinenbau KG, Industriezone 38/C Süd, I-39043 Klausen-Chiusa (BZ)
Rabaud	Rabaud S.A., Bellevue, F-85110 Sainte Cecile Tel.: (+33)251485151, Fax: (+33)251402296, Internet: www.rabaud.com
S+R	S+R Maschinenbau GmbH, Schlag & Reichart Forstseilwinden, 87616 Marktoberdorf Tel.: 08342/9633-0, Fax: 08342/963333
Scheppach	Josef Scheppach GmbH & Co.Günzburger Straße 69, 89335 Ichenhausen Tel.: 08223/4002-0, Fax: 08223/400220, Internet: www.scheppach.com
Stockmann	Johann Stockmann, Vorberg 13, 84513 Erharting
Teräs	Teräs Takomo, PF 32, FIN-61401 Ylistaro
Trautmann	Trautmann-Biberger Agrartechnik, 84051 Altheim Tel.: 08703/2550, Fax: 08703/8341
Trejon	Roland Einsiedler Forstgräte, Im Oster Esch 12, 87787 Wolfertschwenden Tel.: 08334/986239, Fax: 08334/986590
Vogesenblitz	Gert Unterreiner, Fährmannweg 10, 84533 Stammham Tel.: 08678/919931, Fax: 08678/919933, Internet: www.gert-unterreiner.de
Woodline	Feige Forsttechnik, Büddelhagen 25, 51674 Wiehl-Drabenderhöhe Tel.: 02262/2727, Fax: 02262/68850, Internet: www.feige-forsttechnik.de
ZÖMA	ZÖMA, Am Schachtteich, 06254 Zöschen
Holzhackmaschinen (Anschriften zu Herstellerverzeichnis in Anhang B):	
Berkili	SGM GmbH, Heidberg 15, 59602 Rüthen Tel.: 02952/9749 70, Fax: 0 29 52 / 97 49 718, Internet: www.berkili.de
BGU	BGU Südharzer Maschinenbau, Helmestraße 94, 99734 Nordhausen/Harz Tel.: 03631/6297-106, Fax: 03631/6297-111
Bruks	WFW Waldburg Forstmaschinen Wolfegg, Grimmenstein 15, 88364 Wolfegg Tel.: 07527/968-190, Fax: 07527/968-196, Internet: www.wfw-forstmaschinen.de
Cramer	Cramer-Technik, Reimersstraße 36-40, 26789 Leer Tel.: 0491/6095-0, Fax: 0491/6095200, Internet: www.cramer-technik.de
Dücker	Dücker GmbH & Co. KG, Wendfeldstraße 9, 48703 Stadtlohn Tel.: 02563/9392-0, Fax: 02563/939290, Internet: www.duecker.de
ERJO	Heinrich Bührer, CH-8242 Bibern
Eschlböck	Eschlböck Maschinenbau GmbH, Grieskirchner Straße 5, A-4731 Prambachkirchen 3 Tel.: (+43)7277/2303-0, Fax: (+43)7277/230313, Internet: www.eschlboeck.at
Farmi	Hans Riedl GmbH, Helmut-Hückmann-Platz 1, 92694 Etzenricht Tel.: 0961/43117, Fax: 0961/43543
Heizomat	Heizomat GmbH, Maicha 21, 91710 Gunzenhausen Tel.: 09836/9797-0, Fax: 09836/9797-97, Internet: www.heizomat.de
Husmann	Husmann Maschinenfabrik, Postfach 1155, 49758 Lathen Tel.: 05933/1812, Fax: 05933/4971, Internet: www.ewetel.net/~husmann.gmbh/
JBM	JBM Müllers & Backhaus GmbH, Heiderstraße 22, 41844 Wegberg-Arsbeck Tel.: 02436/2027, Fax: 02436/2010, Internet: www.jbm-maschinenbau.de
Jensen	Jensen, Bahnhofstraße 20-22, 24975 Maasbüll Tel.: 04634/9370-0, Fax: 04634/1025, Internet: www.jensen-service.de

Anhang E: Adressenlisten zu den Herstellerverzeichnissen in Anhang A-D und zum Thema Pflanzenöl (Forts.)

Fabrikat	– Firma, Anschrift, Postleitzahl, Ort – Telefon , Fax, Internet
Jenz	Jenz GmbH, Wegholmer Straße 14, 32469 Petershagen Tel.: 05704/9409-0, Fax: 05704/940947, Internet: www.jenz.de
Junkkari	Hans Seibold, Lehrer-Vogl-Weg 24, 83623 Baiernrain Tel.: 08027/7708, Fax: 08027/7317
Klöckner	Klöckner - BMH Wood, Grabenstraße 3, 57647 Hirtscheid Tel.: 02661/28-0, Fax: 02661/28180, Internet: www.bruks-klockner.com
Korn	Korn Umwelttechnik GmbH, Nr. 23 d, 07580 Seelingstädt Tel.: 0365/7301797, Fax: 0365/7301798, Internet: www.korn-umwelttechnik.de
Laimet	P. Habbig, Max-Försterstraße 21, 36396 Steinau Tel.: 06663/919086, Fax: 06663/919087
Longset	Otzberger Forstmaschinen, Am Grundacker 2, 64395 Brensbach Tel.: 06161/9330-0, Fax: 06161/933020
Matec	MATEC System + Technik AG, Mühle 52 a, CH-4952 Eriswil Tel.: (+41)62/9661832, Fax: (+41)62/9662112 Internet: www.vshf.com/german/matec.htm
MUS-MAX	MUS-MAX Landtechnik Urch GmbH, Oberer Markt 8, A-8522 Groß-St. Florian 184 Tel.: (+43)3464/2252, Fax: (+43)3464/2278, Internet: www.mus-max.at
Pezzolato	Mathias Rau GmbH, Gewerbegebiet, 73110 Hattenhofen Tel.: 07164/9413-0, Fax: 07164/941313, Internet: www.rau-forsttechnik.de
Posch	Posch GmbH, Preysingallee 19, 84149 Velden/Vils Tel.: 08742/2081, Fax: 08742/2083, Internet: www.posch.com
Pöttinger	Pöttinger Maschinenfabrik Ges.m.b.H, Industriegelände 1, A-4710 Grieskirchen Tel.: (+43)7248/600-0, Fax: (+43)7248/600-513, Internet: www.pöttinger.at
Rudnik	Rudnuk & Enners Maschinen- u. Anlagenbau GmbH, Industriegebiet, 57642 Alpenrod Tel.: 02662/80070, Fax: 02662/2613, Internet: www.rudnik-enners.com
Schliesing	Hans Schliesing, Kapellener Str. 30, 47239 Duisburg Tel.: 02151/40101, Fax: 02151/406415
Starchl	Helmut Starchl Hackmaschinen, Eppenstein 30, A-8741 Weißkirchen Tel.: (+43)3577/81509, Fax: (+43)3577/81405, Internet: www.members.aon.at/starchl
TP Lindana	MHD-Forsttechnik, Böminghausen 12, 57399 Kirchhundem Tel.: 02723/72524, Fax: 02723/73044
Tünnißen	Tünnißen Spezialmaschinen GmbH, Weserstraße 2, 47506 Neukirchen-Vluyn Tel.: 02845/3043, Fax: 02845/33012
UTC	UTC Fahrzeug- u. Maschinenbau GmbH, Ladestraße 4, 09465 Sehmatal/OT Sehma Tel.: 03733/6704-0, Fax: 03733/670426, Internet: www.utc-gmbh.de
Vogt	Adolf Vogt GmbH & Co. KG, 57392 Schmallenberg-Felbecke
Weiss	Weiss Holz-Hackschnitzeltechnik, Wurzach 1, 83135 Schechen Tel.: 08039/1081, Fax: 08039/3415
Wellink	Wellink Machinetechniek BV, Postfach 28, NL-7140 AA Groenlo Tel.: (+31)544462161, Fax: (+31)544464892, Internet: www.wellnik-holding.nl
Einzelfeuerstätten (Anschriften zu Herstellerverzeichnis in Anhang C):	
Accent	Accent Kamine GmbH, 53894 Mechernich-Firmenich Tel.: 0 22 56 / 95 00 59, Fax: 0 22 56 / 95 00 57
Antik	Antike Kachelöfen – Holtebrink, Mürnsee 13, 83670 Bad Heibrunn Tel.: 08046/1748, Fax: 08046/8046
Attika	Attika Feuer AG Prolog Ofen GmbH, Sennweidstraße 43, CH-6132 Steinhausen Tel.: (+41)417499999, Fax: (+41)417499998
Austroflamm	Austroflamm, Gfereth 101, A-4631 Krenglbach Tel.: (+43)180/3252929, Fax: (+43)180/3252930, Internet: www.austroflamm.com
Bachmann	Bachmann GmbH, Hauptstraße 32, 63825 Westerngrund Tel.: 06024/6713-0, Fax: 06024/671333
Blank	Max Blank GmbH, Klaus-Blank-Straße 1, 91747 Westheim Tel.: 09082/1001-3, Fax: 08082/2002-3, Internet: www.maxblank.com
Boley	Boley GmbH, Exklusive Kamine, Oststraße 58, 40667 Meerbusch Tel.: 02132/76161, Fax: 02132/77144, Internet: www.boley.nl
Brombacher Keramik	Brombacher Keramik, Münklinger Straße 52/1, 71263 Weil der Stadt Tel.: 07033/13592, Fax: 07033/32851

Anhang E: Adressenlisten zu den Herstellerverzeichnissen in Anhang A-D und zum Thema Pflanzenöl (Forts.)

Fabrikat	– Firma, Anschrift, Postleitzahl, Ort – Telefon , Fax, Internet
Brunner	Ulrich Brunner GmbH, Zellhuber Ring 17-18, 84307 Eggenfelden Tel.: 08721/771-0, Fax: 08721/77110, Internet: www.brunner.de
Buderus	Buderus Heiztechnik GmbH, Sophienstraße 30-32, 35576 Wetzlar Tel.: 06441/418-0, Fax: 06441/4181633, Internet: www.heiztechnik.buderus.de
Calimax	Calimax, Entwicklungs- u. Vertriebs-GmbH, Bundessrasse 102, A-6830 Rankweil Tel.: (+43)5522/83677, Fax: (+43)5522/83677-6, Internet: www.climax.cc
Camina	Camina Feuerungssysteme GmbH & Co. KG, Betonstraße 9, 49324 Melle Tel.: 05422/958458, Fax: 05422/958459, Internet: www.camina.de
Caminetti	Caminetti, Mittelweg 143, 20148 Hamburg Tel.: 040/4105580, Fax: 040/418676
CERA	CERA-Design by Britta von Tasch GmbH, Am Langen Graben 28, 52353 Düren-Echtz Tel.: 02421/82087, Fax: 02421/83469, Internet: www.cera.de
Creatherm	Creatherm Kachelofensysteme, Innstraße 24, 84359 Simbach/Inn Tel.: 08571/3653, Fax: 08571/3670, Internet: www.ceratherm.de
Cronspisen	Skanwood GmbH, Steinbacher Straße 1, 97816 Lohr am Main Tel.: 09352/80550, Fax: 09352/80552
DAN-SKAN	DAN-SKAN-Zentrale, Burgwedeler Straße 7-8, 30657 Hannover Tel.: 0511/648048, Fax: 0511/6497881, Internet: www.dan-skan.com
Denk	Denk Keramische Werkstätten KG, Neershofer Straße 123-125, 96450 Coburg Tel.: 09563/2028, Fax: 09563/2020
Dovre	Dovre GmbH, Valenciennerstraße 193, 52355 Düren-Gürzenich Tel.: 02421/961530, Fax: 02421/961531
Ebinger	Ebinger GmbH, Baukeramik, Lindenbach 2, 56130 Bad Ems Tel.: 02603/2196, Fax: 02603/2993
Eisenschmid	Eisenschmid-Kaminbau, Zargesstraße 5, 86971 Peiting Tel.: 08861/68300, Fax: 08861/69790, Internet: www.eisenschmid1.de
Energetec	Energetec Gesellschaft für Energietechnik, Anderterstraße 53, 30629 Hannover Tel.: 0511/5897988, Fax: 0511/58979899
Flam	A.G. V.F.M. Flam, Fabriekstraat 15, B-3800 Sint-Truiden 02241/946282, 02241/946281
Form-TEQ	Form-TEQ, Ahornstraße 21, 58300 Wetter Tel.: 02335/71184, Fax: 02335/71184
Ganz	Ganz Baukeramik AG, Dorfstraße 107, CH-8424 Embrach/ZH. Tel.: (+41)186/50521, Fax: (+41)186/55492, Internet: www.ganz-baukeramik.ch
Gerco	Gerco Apparatebau GmbH, Zum Hilgenbrink 50, 48336 Sassenberg Tel.: 02583/9309-0, Fax: 02583/930999, Internet: www.gerco.de
Glöckel	Glöckel & Rukwid, Keramik, Bahnhofstraße 25, 91634 Wilburgstetten Tel.: 09853/3839-0, Fax: 09853/383990
Grotherm	Grotherm, Kachelöfen u. Kamineinsätze GmbH, Lise-Meitner-Straße 5-7, 48599 Gronau Tel.: 02562/5042, Fax: 02562/5045, Internet: www.grotherm.de
Gutbrod	Gutbrod Keramik GmbH, Medlinger Straße, 89423 Gundelfingen Tel.: 09073/2038, Fax: 09073/2030, Internet: www.gutbrod-keramik.de
Haas	Haas+Sohn Ofentechnik GmbH, Herborner Straße 7-9, 35764 Sinn Tel.: 02772/501-0, Fax: 02772/501455
Hagos	Hagos, Industriestraße 62, 70565 Stuttgart Tel.: 0711/78805-0, Fax: 0111/7880549, Internet: www.hagos.de
Harbeck	Harbeck Metallbau GmbH, Hauptstraße 58, 94167 Tettenweis Tel.: 08534/353, Fax: 08534/1049
Hark	Hark GmbH & Co. KG, Hochstraße 197-201, 47228 Duisburg Tel.: 0180/2802323, Fax: 02065/997199, Internet: www.hark.de
Hase	Hase Kaminöfen, Neukircher Straße 14, 54294 Trier Tel.: 0651/826900, Fax: 0651/826948, Internet: www.kaminofen.de
Heinrichs	Heinrichs Architekturkeramik, Flutgraben 6, 65205 Wiesbaden Tel.: 0611/7119448, Fax: 0611/7119459, Internet: www.designundkeramik.de
Hilpert	Hilpert GmbH, Feuer-Luft-Wärme, Nobelstraße 4, 36041 Fulda Tel.: 0661/928080, Fax: 0661/9280870

Anhang E: Adressenlisten zu den Herstellerverzeichnissen in Anhang A-D und zum Thema Pflanzenöl (Forts.)

Fabrikat	– Firma, Anschrift, Postleitzahl, Ort – Telefon , Fax, Internet
HWAM	HWAM Heat Design AS, Nydamsvej 53-55, DK-8362 Horning Tel.: (+45)86921833, Fax: (+45)86922218
Jasba	Jasba Kachelöfen und –Kamine, Rheinstraße 100, 56235 Ransbach-Baumbach Tel.: 02623/84-0, Fax: 02623/842884, Internet: www.jasba-ofenkachel.de
Jøtul	Jotul Deutschland GmbH, Wahlerstraße 32, 40472 Düsseldorf Tel.: 0211/657979-0, Fax: 0211/657979-29
Jydepejsen	Jydepejsen A/S, Ahornsvinget 3-7, Nr. Felding, DK-7500 Holstebro Tel.: (+45)97410099, Fax: (+45)97425216
Kago	Kago Kamin GmbH & Co. KG, Pyrbaumer Straße 1-5, 92349 Postbauer Tel.: 09188/9200, Fax: 09188/920130, Internet: www.kago.de
Kaminfeuer direkt	Kaminfeuer direkt, Königstraße 73, 72108 Rottenburg Tel.: 07472/948272, Fax: 07472/948273
Kaschütz	Kaschütz Heiztechnologie, Dreikreuzstraße 42, A-3163 Rohrbach/Gölsen Tel.: (+43)2764/2401, Fax: (+43)2764/7682, Internet: www.kaschuetz.at
Keramik Art	Keramik Art, Stadler Straße 2, 86932 Stoffen Tel.: 08196/1713, Fax: 08196/998795
Klass	Klass, Pestalozzistraße 8, 88677 Markdorf Tel.: 07544/71378, Fax: 07544/71378
Koppe	Koppe Keramische Heizgeräte GmbH, Steigenthumbach 4-6, 92676 Eschenbach Tel.: 09645/880, Fax: 09645/1048, Internet: www.ofenkoppe.de
Kretzschmar	Kretzschmar, Töpferei & Kachelofenbau, Beurener Straße 24, 72660 Beuren-Balzholz Tel.: 07025/5655
KSW	KSW Kachelofen GmbH, Hübelteichstraße 7, 95666 Mitterteich Tel.: 09633/92301-0, Fax: 09633/4640
KVK	KVK Kamintechnik, Bocholder Esch 27, 48683 Ahaus-Alsätte Tel.: 02567/965010, Fax: 02567/965055, Internet: www.kvk.kamine.de
Lechnerhof	Lechnerhof, Christel + Hans-Peter Lechner, Stoltenbergstraße 15, 58456 Witten Tel.: 02302/75022, Fax: 02302/72208
Leda	Leda-Werk GmbH & Co. KG Boekhoff & Co., Postfach 1160, 26761 Leer Tel.: 0491/609901, Fax: 0491/6099290, Internet: www.leda.de
Märchenofen	Märchenofen, Staufenbergstraße 5, 89233 Neu-Ulm Tel.: 0731/713792, Fax: 0731/714103
Marggraf	Marggraf Ofenbau, Rodbachhof 10, 74397 Pfaffenhofen Tel.: 07046/930091, Fax: 07046/930092
Matten	Matten GmbH Feuerstätten aus Stahl, Wiesenstraße 9, 56479 Niederroßbach Tel.: 02664/99870-1, Fax: 02664/99870-9
MEZ	MEZ Keramik GmbH, Hauptstraße 42, 56307 Dernbach Tel.: 02689/9411, Fax: 02689/3850, Internet: www.1a-kachelofen.de
Morsø	Morsø Jernstøberi A/S, Furvej 6, DK-7900 Nykøbing Mors Tel.: (+45)96691900, Fax: (+45)97722169, Internet: www.morsoe.com
Mylin	Mylin, Dorfstraße 223, 25920 Risum-Lindholm Tel.: 04661/3560, Fax: 04661/1042
Nibe	Skanwood GmbH, Steinbacher Straße 1, 97816 Lohr am Main Tel.: 09352/80550, Fax: 09352/80552, Internet: www.nibe.se
Olsberg	Olsberg Hermann Everken GmbH, Hüttenstraße 38, 59939 Olsberg Tel.: 02962/805-0, Fax: 02962/805121, Internet: www.olsberg.com
Openfire Rösler	Openfire Rösler-Kamine GmbH, Behringerstr. 1-3, 63303 Dreieich-Offenthal Tel.: 06074/8403-0, Fax: 06074/8403-12, Internet: www.rösler-kamine.de
Oranier	Oranier Heiz-und Kochtechnik GmbH, Weidenhäuser Straße 1-7, 35075 Gladenbach Tel.: 06462/923-0, Fax: 06462/923309
Poli Keramik	Poli Keramik GmbH, Obere Lend 24, A-6060 Hall i.T. Tel.: (+43)5223/56870-0, Fax: (+43)5223/56836, Internet: www.poli.at
Rembserhof	Rembserhof Keramik, Forsthaus Rembserhof, 56235 Ransbach-Baumbach Tel.: 02623/2648, Fax: 02623/4712, Internet: www.rembserhof.de
Rink	Rink-Kachelöfen GmbH, Am Klangstein 18, 35708 Haiger Tel.: 02771/30030-0, Fax: 02771/3003029

Anhang E: Adressenlisten zu den Herstellerverzeichnissen in Anhang A-D und zum Thema Pflanzenöl (Forts.)

Fabrikat	– Firma, Anschrift, Postleitzahl, Ort – Telefon , Fax, Internet
Rüegg	Rüegg Cheminée AG, Schwäntenmos 4, CH-8126 Zumikon/Zürich Tel.: (+41)1/9198282, Fax: (+41)1/9198290
Scanfire	Scanfire Exclusive Feuerstätten GmbH & Co., Weidengrund 10, 32584 Löhne Tel.: 05732/994-0, Fax: 05732/994450
Schätzle	Schätzle Creativ Ofenbau GmbH, Hebelstraße 1, 79183 Waldkirch Tel.: 07681/22526, Fax: 07681/6695
Schipp	Theo Schipp, August-Jeanmaire-Straße 24, 79183 Waldkirch-Kollnau Tel.: 07681/409320, Fax: 07681/409342
Schmid	Schmid Kachelofen-Heizeinsätze, Marktgrafenstr. 9, 95497 Goldkronach Tel.: 09273/989-0, Fax: 09273/98969, Internet: www.schmid-gesmbh.de
Scholl	Scholl keramik, Kurpfalzstraße 141, 67435 Neustadt/Weinstraße Tel.: 06321/66587, Fax: 06321/66575
Skantherm	Skantherm GmbH & Co. KG, Lümernweg 188 a, 33378 Rheda-Wiedenbrück Tel.: 02529/8914, Fax: 02529/1615
Sommerhuber	Sommerhuber, Resthofstraße 69, A-4400 Steyr Tel.: (+43)7252/893-0, Fax: (+43)7252/893210, Internet: www.sommerhuber.co.at
Spartherm	Spartherm-Kaminsysteme, Maschweg 38, 49324 Melle Tel.: 05422/9441-0, Fax: 05422/944114, Internet: www.spartherm.de
Stegemann	Stegemann, Oststraße 21, 48301 Nottuln Tel.: 02502/2315-0, Fax: 02502/6914
Supra	Supra S.A., 28, rue du Général Leclerc, F-67216 Obernai Cedex Tel.: (+33)88951200, Fax: (+33)88951240
Tekon	Tekon, Midlicher Straße 70, 48720 Rosendahl Tel.: 02547/311312, Fax: 02547/311314, Internet: www.tekon.de
Tonangeben	Tonangebend Keramikwerkstatt, Vormholzer Straße 9 A, 58456 Witten Tel.: 02302/72386, Fax: 02302/27721
Tonart	Tonart, Tränkgasse 20, 55278 Undenheim Tel.: 06737/9278, Fax: 06737/9101
Tonwerk Lausen	Tonwerk Lausen AG, Hauptstraße 74, CH-4415 Lausen Tel.: (+41)619279555, Fax: (+41)619279558, Internet: www.twlag.ch
Tulikivi	Tulikivi Oy Niederlassung Deutschland, Wernher-v.-Braun-Straße 5, 63263 Neu-Isenburg Tel.: 06102/7414-0, Fax: 06102/741414, Internet: www.tulikivi.de
Wamsler	Wamsler Haus- und Küchentechnik GmbH, Gutenbergstraße 25, 85748 Garching Tel.: 089/32084-0, Fax: 089/32084-238, Internet: www.wamsler-hkt.de
Wanders	H.A. Wanders B.V., Postfach 26, NL-7070 AA Ulft Tel.: (+31)315/386414, Fax: (+31)315/386201, Internet: www.wanders.com
Waterford	Waterford Stanley Ldt, Bilberry, IRL Waterford - Ireland Tel.: (+35)351302300, Fax: (+35)351302315 Internet: www.cashin.group@wanadoo.fr
Willach	Willach GmbH, Koblenzer Straße 21, 57482 Wenden-Gerlingen Tel.: 02762/5059, Fax: 02762/5140, Internet: www.spechstein.de
Wodtke	Wodtke GmbH, Rittweg 55-57, 72070 Tübingen Tel.: 07071/7003-0, Fax: 07071/7003, Internet: www.wodtke.com
Wolfshöher	Wolfshöher Tonwerke GmbH, Wolfshöhe, 91233 Neunkirchen a. Sand
Wotan	Wotan Heizeinsätze, Heinrich-Hertz-Straße 13, 48599 Gronau Tel.: 02562/818580, Fax: 02562/818578, Internet: www.wotan-heizeinsaetze.de
Ziegler	Ziegler GmbH, Wetzawinkel 33, A-8200 Gleisdorf Tel.: (+43)3112/2977, Fax: (+43)3112/29774, Internet: www.zieglerofen.at
Hersteller von Zentralheizungskesseln (Anschriften zu Herstellerverzeichnis in Anhang D):	
Arca	Arca Heizkessel GmbH, Sonnenstraße 9, 91207 Lauf Tel.: 0 91 23 / 84 581, Fax: 0 91 23 / 84 582, Internet: home.t-online.de/home/ARCA.Heizkessel
Atmos	Atmos Vertrieb – Deutschland, Eichenring 66, 84562 Mettenheim Tel.: 08631/379612, Fax: 08631/15862
Austroflamm	Austroflamm, Gfereth 101, A-4631 Krenglbach Tel.: (+43)7249/464430, Fax: (+43)7249/46636, Internet: www.austroflamm.com
Axiom	Axiom, Postfach 1707, 82362 Weilheim Tel.: 0881/9279194, Fax: 0881/1261, Internet: www.axiom-wt.de

Anhang E: Adressenlisten zu den Herstellerverzeichnissen in Anhang A-D und zum Thema Pflanzenöl (Forts.)

Fabrikat	– Firma, Anschrift, Postleitzahl, Ort – Telefon , Fax, Internet
Baxi / Föbi	Föbi Zentralheizungsherde GmbH, Raiffeisenstraße 4, 83673 Bichl Tel.: 08857/9688, Fax: 08857/1658, Internet: www.baxi.dk
Biogen	Biogen Heiztechnik GmbH, Plainburgerstraße 503, A-5084 Großgmain Tel.: (+43)6247/7259, Fax: (+43)6247/8796
Brunner	Ulrich Brunner GmbH, Zellhuber Ring 17-18, 84307 Eggenfelden Tel.: 08721/771-0, Fax: 08721/77110, Internet: www.brunner.de
Buderus	Buderus Heiztechnik GmbH, Postfach 1220, 35522 Wetzlar Tel.: 06441/418-0, Fax: 06441/4181633, Internet: www.heiztechnik.buderus.de
Compello	Sonnenkraft GmbH, Berliner Straße 16, 93073 Neutraubling Tel.: 09401/92320, Fax: 09401/923232, Internet: www.sonnenkraft.com
Cormal	Cormall A/S Maskinfabrikken, Tornholm 3, DK-6400 Sønderborg Tel.: (+45)74486111, Fax: (+45)74486120, Internet : www.cormall.dk
CTC	CTC Heizkessel Wärmetechnik K. Berthold, Friedhofsweg 8, 36381 Schlüchtern-Wallroth Tel.: 06661/4697, Fax: 06661/71114, Internet: www.ctc-heizkessel.de
Dan Trim	DanTrim A/S, Islandsvej 2, DK-7480 Vildbjerg Tel.: (+45)97133400, Fax: (+45)97133466
De Dietrich	De Dietrich GmbH, Kinzingstraße 12, 77694 Kehl/Rhein Tel.: 07851/797237, Fax: 07851/797298, Internet: www.dedietrichheiztechnik.de
EcoTec	ZE Holzsysteme Vertriebsgesellschaft mbH, Hocheckstraße 32, 83075 Bad Feilnbach Tel.: 08066-9191, Fax: 08066-9193, Internet: www.ecotec.net
Eder	Eder GmbH, A-5733 Bramberg, Friedberger Straße 10, 90455 Nürnberg Tel.: 0911/ 884804, Fax: 0911/882816, Internet: www.eder.de
ELCO Klöckner	ELCO Klöckner Heiztechnik GmbH, Hohenzollernstr. 31, 72379 Hechingen Tel.: 07471/187-0, Fax: 07471/187580, Internet: www.elco-kloeckner.de
Endreß	Endreß Metall- und Anlagenbau GmbH, Postfach 1141, 91533 Rothenburg-Vorbach Tel.: 09861/3294, Fax: 09861/86746
Enickl	Ing. Friedrich Enickl, Nöckhamstraße 3, A-4407 Dietachdorf Tel.: (+43)7252/38267, Fax: (+43)7252/38267
Eszmeister	Anlagenbau Eszmeister, Seuttergasse 50, A-2492 Eggendorf Tel.: (+43)2622/73458, Fax: (+43)2622/73605, Internet : www.eszmeister.at
ETA	ETA Heiztechnik GmbH, Hs.-Nr. 76, A-4715 Taufkirchen a.d.Tr. Tel.: (+43)734/2288-0, Fax: (+43)7734/228822, Internet: www.eta-heiztechnik.at
Eurowarm	Eurowarm sri, Via Roma 12, I-35010 Loreggia Padova Tel.: (+39)499300366, Fax: (+39)495794560
Ferro	Ferro Wärmetechnik, Am Kiefernschlag 1, 91126 Schwabach Tel.: 09122/9866-0, Fax: 09122/986633, Internet: www.ferro-waermetechnik.de
Fischer	Georg Fischer GmbH & Co., Heidenheimer Straße 63, 89302 Günzburg Tel.: 08221/9019-0, Fax: 08221/901968, Internet: www.fischer-heiztechnik.de
Fröling /A	Fröling Heizkessel- und Behälterbau GmbH, Industriestraße 12, A-4710 Grieskirchen Tel.: (+43)7248/606-0, Fax: (+43)7248/606600 Internet: www.froeling.at
Fröling /D	Fröling Heiztechnik GmbH & Co., Hoffnungsthaler Str. 41, 51491 Overath Tel.: 02204/720-0, Fax: 02204/720338, Internet: www.froeling.de
Gerco	Gerco Apparatebau GmbH, Zum Hilgenbrink 50, 48336 Sassenberg Tel.: 02583/930921, Fax: 02583/930999, Internet: www.gerco.de
Gerlinger	Ernst Gerlinger, Froschau 79, A-4391 Waldhausen Tel.: (+43)7418/230, Fax: (+43)7418/2304, Internet: www.biokompakt.com
Gilles	Gilles Energie- und Umwelttechnik GmbH, Koaserbauer Straße 16, A-4810 Gmunden Tel.: (+43)7612/737600, Fax: (+43)7612/7376017, Internet: www.gilles.at
Graner	Graner Kesselbau, Holderäckerstraße 3, 70839 Gerlingen Tel.: 07156/21058, Fax: 07156/27156, Internet: www.graner-kesselbau.de
Grimm	Fritz Grimm Heizungstechnik GmbH, Bäumlstraße 26, 92224 Amberg Tel.: 09621/81267, Fax: 09621/85057, Internet: www.grimm-heizung.de
Guntamatik	Guntamatic Heiztechnik GmbH, Bruck-Waasen 7, A-4722 Peuerbach Tel.: (+43)7276/2441-0, Fax: (+43)7276/3031 Internet: www.guntamatic.at
Hager	Hager, Laaer Straße 110, A-2170 Poysdorf Tel.: (+43)2552/2110-0, Fax: (+43)2552/2110-6, Internet: www.hager-heizt.de

Anhang E: Adressenlisten zu den Herstellerverzeichnissen in Anhang A-D und zum Thema Pflanzenöl (Forts.)

Fabrikat	– Firma, Anschrift, Postleitzahl, Ort – Telefon , Fax, Internet
Hargassner	Hargassner Holzverbrennungsanlage, Gunderding 8, A-4952 Weng Tel.: (+43)7723/5274, Fax: (+43)7723/52745, Internet: www.hargassner.at
HDG Bavaria	HDG Bavaria Kessel- u. Apparatebau GmbH, Siemensstraße 6, 84320 Massing/Rott Tel.: 08724/897-10, Fax: 08724/8159, Internet: www.hdg-bavaria.de
Heitzmann	Heitzmann AG Energietechnik, Gewerbering, CH-6105 Schachen Tel.: (+41)41/4973020, Fax: (+41)41/4973277, Internet: www.heitzmann.ch
Heizomat	Heizomat-Gerätebau GmbH, Maicha 21, 91710 Gunzenhausen Tel.: 09836/9797-0 , Fax: 09836/9797-97 Internet: www.heizomat.de
Herlt	Christian Herlt Dipl.-Ing., An den Buchen, 17194 Vielist Tel.: 03991/167995, Fax: 03991/167996
Herz	Herz Feuerungstechnik GmbH, Sebersdorf 138, A-8272 Sebersdorf Tel.: (+43)3333/2411-0, Fax: (+43)3333/241673, Internet: www.herz-feuerung.com
HOBAG	HOBAG-Brienz AG, Lauenenstraße 51, CH-3855 Brienz Tel.: (+41)33/9513272, Fax: (+41)33/9513604, Internet: www.hobag.ch
Hohmann	Hohmann Klose GmbH, Im Ettenbach 13a, 77767 Appenweier Tel.: 07805/3021, Fax: 07805/2078
Hoval	Deutsche Hoval GmbH, Freiherr-vom-Stein-Weg 15, 72108 Rottenburg am Neckar Tel.: 0180/5016325, Fax: 07472/16350, Internet: www.hoval.de
HT Engineering	HT Engineering / Biomassetechnik Ottowitz, Im Winkel 15, A-6850 Dombirn, Tel.: (+43)5572/33025, Fax: (+43)5572/330254
Huber	Walter Huber GmbH, Fuggerstraße 30, 84561 Mehringöd Tel.: 08677/64628, Fax: 08677/65385
KÖB & Schäfer	KÖB & Schäfer OHG, Unterlinden 5, A-6922 Wolfurt Tel.: (+43)5574/6770-0, Fax: (+43)5574/65707, Internet: www.koeb-schaefer.com
Künzel	Paul Künzel GmbH & Co, Postfach 1960, 25409 Pinneberg Tel.: 04101/7000-0, Fax: 04101/700040, Internet: www.kuenzel.de
KWB	KWB - Kraft und Wärme aus Biomasse GmbH, Raab 235, A-8321 St. Margarethen Tel.: (+43)3115/6116-0, Fax: (+43)3115/61164, Internet: www.kwb.at
Limbacher	Limbacher Maschinen- und Anlagenbau, Wiesethbruck 35, 91572 Bechhofen Tel.: 09822/5274, Fax: 09822/5274
Lopper	Lopper Kesselbau GmbH, Rottenburger Straße 7, 93352 Rohr/Alzhausen Tel.: 08783/9685-0, Fax: 08783/968520
Müller	Müller AG Holzfeuerungen, Bechburgerstraße 21, CH-4710 Balsthal Tel.: (+41)62/3915979, Fax: (+41)62/3913118, Internet: www.tiba-mueller.ch
Nolting	Ing. Herbert Nolting GmbH, Wiebuschstr. 15, 32760 Detmold Tel.: 05231/9555-0, Fax: 05231/955555, Internet: www.nolting-online.de
Oertli Rohleder	Oertli Rohleder Wärmetechnik GmbH, Raiffeisenstraße 3, 71696 Möglingen Tel.: 07141/2454-0, Fax: 07141/2454-88, Internet: www.oertli.de
ÖkoFen	ÖkoFen GmbH, Mühlgasse, A-4132 Lembach 9 Tel.: (+43)7286/7450, Fax: (+43)7286/7809, Internet: www.pelletsheizung.at
Ökotherm	Ökotherm-Projekt GmbH, August-Bebel-Straße 24 E, 09453 Scharfenstein Tel.: 03725/707638, Fax: 03725/707621 Internet: www.oekotherm.dkk.de
Palazzetti	Palazzetti Lelio spa, Via Roveredo 103, I-33080 Porcia (PN) Tel.: (+39)434/922922, Fax: (+39)434/922355
Paradigma	Ritter Energie- und Umwelttechnik GmbH & Co. KG, Ettlinger Straße 30, 76307 Karlsruhe Tel.: 07202/922-0, Fax: 07202/922-100, Internet: www.paradigma.de
Passat	Passat Energi GmbH, Morgenstern 16, 24870 Ellingstedt Tel.: 04627/189500, Fax: 04627/189501, Internet: www.passat.dk
Perhofer	Perhofer Bio-Heizungs-GmbH & Co. KG, Waisenegg 115, A-8190 Birkfeld Tel.: (+43)3174/3705, Fax: (+43)3174/37058, Internet: www.biomat.at
Prüller	Kalkgruber Solar- und Umwelttechnik, Graben 6, A-4421 Aschbach/Steyr Tel.: (+43)7259/5002-0, Fax: (+43)7259/5002-10, Internet: www.kalkgruber.at
Reka	Maskinfabrik REKA A/S, Westvej 7, DK-9600 Års Tel.: (+45)9/8624011, Fax: (+45)9/8624071, Internet: www.reka.com
SBS	SBS Heizkessel Vertriebs GmbH, Carl-Benz-Straße 17-21, 48268 Greven Tel.: 02575/3080, Fax: 02575/30829, Internet: www.sbs-heizkessel.de

Anhang E: Adressenlisten zu den Herstellerverzeichnissen in Anhang A-D und zum Thema Pflanzenöl (Forts.)

Fabrikat	– Firma, Anschrift, Postleitzahl, Ort – Telefon , Fax, Internet
Schmid	Schmid GmbH & Co. KG, Holzfeuerung, Kettemerstraße 25, 70794 Filderstadt Tel.: 0711/709560, Fax: 0711/7095610, Internet: www.holzfeuerung.ch
sht	sht - Heiztechnik aus Salzburg GmbH, Rechtes Salzachufer 40, A-5101 Salzburg-Bergheim Tel.: (+43)662/450444-0, Fax: (+43)662/450444-9, Internet: www.sht.at
Sommerauer	Sommerauer & Lindner, Trimmelkam 113, A-5120 St. Pantaleon Tel.: (+43)6277/7804, Fax: (+43)6277/7818, Internet: www.sl-heizung.at
Thermostrom	Thermostrom Energietechnik GmbH, Ennserstraße 91, A-4407 Steyr Tel.: (+43)7252/38271, Fax: (+43)7252/3827325, Internet: www.strebel.at
Unical	Unical Heizkessel GmbH, Ikarusstr. 8, 04435 Schkeuditz Tel.: 034207/7790, Fax: 034207/41439, Internet: www.unical.de
UTC	UTC Fahrzeug- u. Maschinenbau GmbH, Ladestraße 4, 09465 Sehmatal/OT Sehma Tel.: 03733/67040, Fax: 03733/670426, Internet: www.utc-gmbh.de
Viessmann	Viessmann Werke, Postfach 10, 35105 Allendorf Tel.: 06452/70-0, Fax: 06452/702780, Internet: www.viessmann.de
Windhager	Windhager Zentralheizung, Deutzring 2, 86405 Meitingen Tel.: 08271/8056-0, Fax: 08271/805630, Internet: www.windhager.com
WVT	WVT Wirtschaftliche Verbrennungs-Technik GmbH, Bahnhofstraße 55-59, 51491 Overath-Untereschbach Tel.: 02204/9744-0, Fax: 02204/974426, Internet: www.bioflamm.de
Zima	ZIMAtech GmbH & Co. KG, Lochmatt 6, 77880 Sasbach Tel.: 07841/640770 -3066, Fax: 07841/5687, Internet: www.zimatech.com
BHKW-Module:	
AAN	Anlagen- und Antriebstechnik Nordhausen GmbH, Alte Leipziger Straße 50, D-99735 Bielen/Stadt Nordhausen, Tel.: 03631/918350, Fax: 03631/918340, http://aan-energie.de
Hausmann	Hausmann Lackiererei Karosserie, Am Angertor 3, D-97618 Wülfershausen, Tel.: 09762/506, Fax: 09762/506
Henkelhausen	Henkelhausen GmbH & Co. KG, KHD-Deutz, Hafenstr. 51, D-47809 Krefeld, Tel.: 02151/574-209, Fax: 02151/574-112, http://www.henkelhausen.com
Konrad Weigel	Konrad Weigel Energietechnik, Hauptstraße 33, D-92342 Freystadt-Sulzkirchen, Tel.: 09179/5880, Fax: 09179/90562, http://www.kw-energietechnik.de
KPM	KPM Pflanzenöl-Marine-Motoren, Ahlershof 18, D-56112 Lahnstein, Tel.: 02621/40550, Fax: 02621/18398, http://www.krahwinkel-kpm.de
MWS	Löschenkohl & Mitter Motorenwerk, Barbarastraße 9, D-39218 Schönebeck, Tel.: 03928/4540, Fax: 03928/454613
Natur-Energie-Technik	Natur-Energie-Technik, Dosch & Stumpf G.b.R., Bocksbeutelstraße 2, D-97337 Dettelbach, Tel.:09324/980-899, Fax: 09324/980-811
OIKO Energy	OIKO Energy GmbH, Pilgerndorf 40, D-96142 Hollfeld, Tel.: 09206/992425, Fax: 09206/992426
VWP	Vereinigte Werkstätten für Pflanzenöltechnologie GbR, Am Steigbühl 2, D-90584 Allersberg, Tel.: 09174/2862, Fax: 09174/2621, http://www.pflanzenoel-motor.de
Pflanzenöltaugliche Heizungsbrenner:	
BayRay	Bayerische Ray Energietechnik GmbH & Co KG, Dieselstraße 5, D-85748 Garching Tel.: 089/329004-0, Fax: 089/329004-40, Internet: www.bayray.de
Kroll	Kroll GmbH, Pfarrgartenstraße 46, D-71737 Kirchberg/Murr Tel.: 089/7144/830-200, Fax: 089/7144/830-201, Internet: www.kroll.de
NET	NET Neue Energie Technik, Moosstraße 195, A-5020 Salzburg Tel.: 0662/828729, Fax: 0662/828729-60, Internet: www.sbgenergy.net
Ruhr Benner	Ruhr Brenner GmbH, Reichshofstraße 3, D-58239 Schwerte-Westhofen Tel.: 02304/68051, Fax: 02304/63251
SCHEER Heiztechnik	SCHEER Heiztechnik GmbH, Chausseestraße 12-16, D-25797 Wöhrden Tel.: 04839/905-0, Fax: 04839/453, http://www.scheer-heiztechnik.de
Bezugsquellen für Pflanzenöl (auf Grund der höheren Aktualität wird hier auf laufend ergänzte Internet-Anbieterlisten verwiesen):	
www.fnr.de (→Adressen →Grundstoffproduzenten →Fette, Öle und Biodiesel)	
www.carmen-ev.de (→Marktplatz →biogene Brennstoffe →Pflanzenöl)	
www.rerorust.de (→Lieferanten für Pflanzenöl, →Tankstellenverzeichnis)	

Anhang F: Informationsstellen für öffentliche Fördermaßnahmen

Biomasse Info-Zentrum am Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart, Heßbrühlstr. 49a, D-70565 Stuttgart, Tel.: 0711-78139-08, Fax.: 0711-78061-77,
Email: info@biomasse-info.net, Internet: www.biomasse-info.net

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Hofplatz 1, D-18276 Gülzow,
Tel. 03843-6930-0, Fax: 03843-6930-102, Email: info@fnr.de, Internet: www.fnr.de

CARMEN e.V. im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, Schulgasse 18, D-94315 Straubing,
Tel.: 09421-960-300, Email: contact@carmen-ev.de, Internet: www.carmen-ev.de

Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle, Frankfurter Str. 29-35, D-65760 Eschborn, Postfach 5160,
Tel.: 06196-908-0, Fax: 06196-908-800, Email: bundesamt@bafa.de, Internet: www.bafa.de

Anhang G: Weiterführende Literatur (Bücher und andere Quellen)

Biomasse Info-Zentrum (BIZ): Pellet-Zentralheizungen – Marktübersicht. Broschüre der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe FNR (Hrsg.), Gülzow, 1. Auflage, Februar, 2002, 63 S.

FNR (Hrsg.): Leitfaden Bioenergie – Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR), Gülzow, 2000

Hartmann, H.; Kaltschmitt, M. (Hrsg.): Biomasse als erneuerbarer Energieträger – Eine technische, ökologische und ökonomische Analyse im Kontext der übrigen erneuerbaren Energien. Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe (Band 3, Neubearbeitung), Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (Hrsg.), Landwirtschaftsverlag, Münster-Hiltrup, 2002.

Kaltschmitt, M.; Hartmann, H. (Hrsg.): Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren. Springer Verlag, Berlin, 2001, 770 S.

Marutzky, R.; Seeger, K.: Energie aus Holz und anderer Biomasse; DRW, Stuttgart, 1999

Nussbaumer, T.; Good, J.; Jenni, A.; Bühler, R.: Automatische Holzheizungen – Grundlagen und Technik. Schweizerisches Bundesamt für Energie (Hrsg.), Eigenverlag, Bern 2001; 110 S.

Nussbaumer, T.; Good, J.; Jenni, A.; Bühler, R.; Gabathuler, H. Automatische Holzheizungen – Planung und Ausführung. Schweizerisches Bundesamt für Energie (Hrsg.), Eigenverlag, Bern 2001; 175 S.

Obernberger, I.: Nutzung fester Biomasse in Verbrennungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung des Verhaltens aschebildender Elemente; dbv Verlag, Graz, 1997, 348 S.

Pfestorf, K.H.: Kachelöfen und Kamine handwerksgerecht gebaut. Verlag Bauwesen, Berlin, 2000, 5. Aufl.; 272 S.

Strehler, A.: Informationen zu Wärmegewinnung aus Biomasse – Sammelmappe zu den regelmäßigen Be-ratungsveranstaltungen an der Bayerischen Landesanstalt für Landtechnik, Eigenverlag, überarbeitete Aufl., Juni 2002

Thuneke, K.; Remmele. E.: (2002): Pflanzenölbetriebene Blockheizkraftwerke – Leitfaden. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (Hrsg.), München, 2002, Reihe "Materialien", Nr. 170.

Uth, J. (2000). Scheitholzvergaserkessel. Broschüre der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe FNR (Hrsg.), Gülzow, 2. Auflage 2000, 52 S.

Anhang H: Energieeinheiten und Umrechnungsfaktoren

Vorsätze und Vorsatzzeichen

Kilo	k	10^3	Tausend
Mega	M	10^6	Million
Giga	G	10^9	Milliarde
Tera	T	10^{12}	Billion
Peta	P	10^{15}	Billarde
Exa	E	10^{18}	Trillion

Einheiten für Energie und Leistung

Joule (J): Energie, Arbeit und Wärmemenge
Watt (W): Leistung, Energiestrom und Wärmestrom

1 Joule (J) = 1 Newtonmeter (Nm) = 1 Wattsekunde (Ws) = 1 kg m^2/s^2

Umrechnungsfaktoren

(Die Zahlenangaben beziehen sich grundsätzlich auf den Heizwert (H_u))

Energieeinheit[a]	MJ	kWh	t SKE	kg OE
1 Megajoule (MJ)	–	0,278	0,0000341	0,0235
1 Kilowattstunde (kWh)	3,6	–	0,000123	0,00065
1 t Steinkohleneinheit (t SKE)	29.308	8.140	–	689,655
1 kg Öläquivalent (kg OE) (Heizöl)	42,5	11,81	0,00145	–

a. nicht mehr gebräuchlich: 1 kcal (Kilokalorie) = 4,186 kJ

Häufig gebrauchte Umrechnungsfaktoren:

1 PJ = 0,0341 Mio. t SKE
1 TWh = 3,6 PJ
1 Mio. t SKE = 29,3 PJ

Anhang I: Faktoren (F) zur Umrechnung von normierten Massenkonzentrationen auf energiemengenbezogene Emissionen

Wassergehalt w (%) (bezogen auf Gesamtmasse)	Faktor F (Nm^3/MJ)			
	Brennstoff:			
	Laubholz		Nadelholz	
	Bezugssauerstoffgehalt			
	13 % O_2	11 % O_2	13 % O_2	11 % O_2
10	0,6364	0,5091	0,6621	0,5297
12	0,6385	0,5108	0,6643	0,5314
14	0,6408	0,5127	0,6666	0,5333
16	0,6432	0,5146	0,6691	0,5352
18	0,6458	0,5166	0,6717	0,5373
20	**0,6485**	0,5188	0,6744	0,5395
22	0,6514	0,5211	0,6773	0,5418
24	0,6544	0,5235	0,6804	0,5443
26	0,6576	0,5261	0,6837	0,5469
28	0,6611	0,5289	0,6872	0,5497
30	0,6648	0,5318	0,6909	0,5527
32	0,6687	0,5350	0,6949	0,5559
34	0,6730	0,5384	0,6992	0,5594
36	0,6775	0,5420	0,7039	0,5631
38	0,6825	0,5460	0,7089	0,5671
40	0,6878	0,5502	0,7143	0,5714
42	0,6936	0,5549	0,7201	0,5761
44	0,6999	0,5599	0,7265	0,5812
46	0,7069	0,5655	0,7335	0,5868
48	0,7145	0,5716	0,7412	0,5930
50	0,7229	0,5783	0,7497	0,5998
52	0,7322	0,5858	0,7591	0,6073
54	0,7426	0,5941	0,7697	0,6157
56	0,7543	0,6035	0,7815	0,6252
58	0,7676	0,6141	0,7948	0,6358
60	0,7827	0,6262	0,8100	0,6480

Berechnungsbeispiel:

gegeben:	Emission bei 13 % O_2:		200 mg/Nm^3
	Brennstoff:		Laubholz
	Wassergehalt des Brennstoffs:		20 %
gesucht:	energiemengenbezogene Emission		
Ergebnis:	Umrechnungsfaktor:		0,6485 m^3/MJ
	200 mg/Nm^3 x 0,6485 m^3/MJ	=	130 mg/MJ

Umrechnung von MJ auf kWh: 1 kWh = 3,6 MJ

Die Faktoren wurden auf Basis der mittleren Brennstoffzusammensetzung für Laub-/Nadelholz berechnet.

Anhang J: Faktoren (F) zur Umrechnung von Emissionsangaben bei unterschiedlichem Bezugssauerstoffgehalt

Bezugs-O_2-Gehalt (%)		Emission E_{neu}									
		4	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**
Emission E_{alt}	**4**	-	0,941	0,882	0,824	0,765	0,706	0,647	0,588	0,529	0,471
	5	1,063	-	0,938	0,875	0,813	0,750	0,688	0,625	0,563	0,500
	6	1,133	1,067	-	0,933	0,867	0,800	0,733	0,667	0,600	0,533
	7	1,214	1,143	1,071	-	0,929	0,857	0,786	0,714	0,643	0,571
	8	1,308	1,231	1,154	1,077	-	0,923	0,846	0,769	0,692	0,615
	9	1,417	1,333	1,250	1,167	1,083	-	0,917	0,833	0,750	0,667
	10	1,545	1,455	1,364	1,273	1,182	1,091	-	0,909	0,818	0,727
	11	1,700	1,600	1,500	1,400	1,300	1,200	1,100	-	0,900	0,800
	12	1,889	1,778	1,667	1,556	1,444	1,333	1,222	1,111	-	0,889
	13	2,125	2,000	1,875	1,750	1,625	1,500	1,375	**1,250**	1,125	-

Anwendung:

$E_{neu} = F \times E_{alt}$

$$\text{mit } F = \frac{21 - O_{2\,neu}}{21 - O_{2\,alt}}$$

Berechnungsbeispiel:

gegeben: CO_{alt} bei 13 % O_2 = 150 mg/Nm^3

gesucht: CO_{neu} bei 11 % O_2

Ergebnis: Umrechnungsfaktor F = 1,250
CO_{neu} = 1,250 x 150 mg/Nm^3 = 188 mg/Nm^3

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR)
Hofplatz 1 · 18276 Gülzow
Tel.: 0 38 43 / 69 30 - 0 · Fax: 0 38 43 / 69 30 - 1 02
E-Mail: info@fnr.de · Internet: http://www.fnr.de

Mit Förderung des Bundesministeriums für
Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft

ISBN 3-00-011041-0