



DBFZ Report Nr. 14

Holzpelletbereitstellung für Kleinfeuerungsanlagen

Analyse und Bewertung von Einflussmöglichkeiten auf die Brennstofffestigkeit

Janet Witt

Anfahrt / Impressum



Anfahrt

... mit dem Zug

Ankunft Leipzig Hauptbahnhof; Straßenbahn Linie 3/3E (Richtung Taucha/Sommerfeld) bis Haltestelle „Bautzner Straße“; Straße überqueren, Parkplatz rechts liegen lassen und geradeaus durch das Eingangstor Nr. 116, nach ca. 100 m links. Der Haupteingang des DBFZ befindet sich nach weiteren 60 m auf der linken Seite.

... mit dem Auto

Über die Autobahn A 14; Abfahrt Leipzig Nord-Ost, Taucha; Richtung Leipzig; Richtung Zentrum, Innenstadt; nach Jet Tankstelle links einfahren (siehe „... mit dem Zug“).

... mit der Straßenbahn

Linie 3/3E Richtung Taucha/Sommerfeld bis zur Haltestelle „Bautzner Straße“ (siehe „... mit dem Zug“).

Autor des Berichts

MSc Dipl.-Ing. (FH) Janet Witt

Impressum

Herausgeber

DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum
gemeinnützige GmbH, Leipzig, mit Förderung des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

Kontakt

DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum
gemeinnützige GmbH
Torgauer Straße 116
D-04347 Leipzig
Tel.: +49 (0)341 2434 - 112
Fax: +49 (0)341-2434 - 133
info@dbfz.de
www.dbfz.de

Geschäftsführung

Prof. Dr. mont. Michael Nelles
(wissenschaftlicher Geschäftsführer)
Daniel Mayer
(administrativer Geschäftsführer)

DBFZ Report Nr. 14

ISSN: 2190-7943

Bilder: Deutsches Biomasseforschungszentrum (DBFZ), Pixelio
Druck: Fischer druck&medien

DBFZ, Leipzig 2012

© Copyright: Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil dieser Broschüre darf ohne die schriftliche Genehmigung des Herausgebers vervielfältigt oder verbreitet werden. Unter dieses Verbot fällt insbesondere auch die gewerbliche Vervielfältigung per Kopie, die Aufnahme in elektronische Datenbanken und die Vervielfältigung auf CD-ROM.

**Holzpelletbereitstellung für Kleinfeuerungsanlagen –
Analyse und Bewertung von
Einflussmöglichkeiten auf die Brennstofffestigkeit**

Vom Promotionsausschuss der
Technischen Universität Hamburg-Harburg
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur(in) (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation
von

Janet Witt

aus
Schkeuditz

2012

VORWORT

*„Zwei Dinge sind zu unserer Arbeit nötig:
Unermüdliche Ausdauer und die Bereitschaft,
etwas, in das man viel Zeit und Arbeit gesteckt hat,
wieder wegzuwerfen.“*

*Albert Einstein (1879 – 1955),
Deutscher Physiker und Nobelpreisträger*

Mit vielen Ideen und einer optimistischen Grundeinstellung begann ich im Jahr 2008 die Dissertationsschrift am Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft (IUE) der Technischen Universität Hamburg-Harburg (TUHH). Das Zitat von Albert Einstein beschreibt ziemlich treffend auch meinen Weg und die Erkenntnis die nötig war, um die vorliegende Arbeit zum Abschluss zu bringen.

Auf diesem Weg begleitete und unterstützte mich vor allem mein Doktorvater Herr Prof. Dr.-Ing. Martin Kaltschmitt, an den ich hier ein besonderes Wort des Dankes richten möchte. Seine unermüdliche Kritik, aber auch die vielen konstruktiven Hinweise und wertvollen Anregungen, bereicherten die Arbeit beachtlich. Einen ebenso wichtigen Beitrag zur Fertigstellung meiner Doktorarbeit hat Herr Prof. Dr.-Ing. Stefan Heinrich als Zweitgutachter geleistet.

Danke sage ich auch Herrn Dipl.-Ing. Wolfgang Schlaug vom Unternehmen PLANT Engineering GmbH, dessen Wissen und Erfahrungen zur Holzpelletierung mich während der Bearbeitung eines gemeinsamen Forschungsprojektes so begeisterte, dass ich dies zum Anlass nahm, mich selber der Thematik zu widmen. Seine fachlichen Hinweise trugen auch während der Anfertigung der Dissertation zum Gelingen der Arbeit bei.

Weiterhin bedanken möchte ich mich bei meinem langjährigen Arbeitgeber – der DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH in Leipzig (ehemals Institut für Energetik und Umwelt, IE) –, das mir die Möglichkeit zur Promotion eröffnete und mein Interesse an der Themenstellung immer wieder durch neue Fragestellungen anregte.

Und nicht zuletzt danke ich von ganzem Herzen meinen Eltern, die in jeglicher Hinsicht das Fundament für meinen Weg gelegt haben. Ohne das Verständnis, die Unterstützung und die Geduld meiner Familie während der gesamten Bearbeitungszeit wäre der erfolgreiche Abschluss der berufsbegleitenden Dissertation nicht möglich gewesen.

Leipzig, August 2012

KURZFASSUNG

Ziel der Arbeit ist es, eine Prozesskettenanalyse der Holzpelletbereitstellung bis hin zum Einsatz der Pellets in Kleinfeuerungsanlagen zur Wärmebereitstellung unter Einbeziehung theoretischer und praktischer Untersuchungen durchzuführen (Pelletierversuche mit über 30 Brennstoffchargen). Dabei steht die Analyse und Bewertung von Einflussmöglichkeiten auf die Brennstofffestigkeit – einschließlich der Auswirkungen des additiven Bindemiteleinsatzes – bei der Produktion von Holzpellets für Kleinfeuerungsanlagen im Fokus der Untersuchungen.

Für die Herstellung der Holzpellets wird fast ausschließlich naturbelassenes und nahezu rindenfreies Holz eingesetzt. Die Bereitstellung von geeignetem Rohmaterial stellt auf einem Markt mit begrenzt vorhandenen Ressourcen, steigenden Nutzungskonkurrenzen und Brennstoffanforderungen eine zunehmende Herausforderung dar. Deshalb versuchen Pelletproduzenten die vorhandene Produktionstechnik permanent anzupassen und die Akteure aller Prozesse entlang der Bereitstellungskette in die Qualitätssicherung des Brennstoffs einzubinden.

Eine Maßnahme ist die zunehmende Spezifizierung der Einsatzstoffe zur Holzpelletproduktion hinsichtlich ihrer Herkunft / Anfallort und der charakteristischen Rohstoffeigenschaften. Daraus lässt sich nicht nur die Eignung eines Rohmaterials zur Pelletproduktion ableiten sondern auch eine Abschätzung der mechanisch-physikalischen bzw. chemisch-stofflichen Brennstoffeigenschaften – einschließlich Aussagen zum Aschegehalt und dem Ascheschmelzverhalten.

Die Wirkung des holzeigenen Bestandteils Lignin den Zusammenhalt der Spanteilchen nach der Pelletierung durch die Bildung von Brückenbindungen zu unterstützen ist bekannt. Sind keine ausreichenden Mengen an aktivierbaren natürlichen Bindemitteln im Pressgut vorhanden, werden Additive / Presshilfsmittel (PHM) zugeführt, um eine ausreichende Brennstofffestigkeit zu erzielen. Ihre Fähigkeit zur Agglomeration wird nicht nur von der Art, Konzentration und Dosierung bestimmt sondern auch von der Verfügbarkeit eines Lösungsmittels (Wasser) und einem individuellen Temperaturniveau in dem das PHM seine Quellwirkung und Klebkraft aktivieren kann. Die Versuche zur Pelletierung von Holzpellets ohne PHM und mit 5 verschiedenen handelsüblichen Stärken unterschiedlicher Dosierung zeigen, wie sich gezielte Konditionierungsmaßnahmen mit Wasser und Dampf auf die Pelletierfähigkeit des Pressgutes und die Brennstofffestigkeit auswirken können.

Jedes PHM neigt zu einer spezifischen Bindefähigkeit (Bindekraft) und diese beeinflusst die (mechanische) Brennstofffestigkeit. Als Lösungsmittel für die Stärken ist ein ausreichender Wassergehalt während der Pressgutkonditionierung notwendig. Die Konditionierung mit Dampf dient eher zur thermischen Aktivierung der holzeigenen und additiven Bindemittel. Die Quellwirkung der stärkehaltigen PHM kann durch die Dampfkonditionierung optimiert werden, wodurch sich deren Bindekräfte besser entfalten und die Presseigenschaften des Materials (Schmierfähigkeit) verbessern.

Neben dem Einsatz von PHM und der Pressgutkonditionierung mit Wasser oder Dampf werden entlang der Prozesskette eine Vielzahl weiterer Faktoren identifiziert, die durch natürliche bzw. rohstoffbedingte, technische und managementbedingte Einflussmöglichkeiten die Brennstofffestigkeit direkt oder indirekt lenken. Eine besonders hohe Bedeutung kommt dabei der Rohmaterialauswahl, der Rohstoffkonditionierung und dem Einfluss der beteiligten Akteure während der Holzpelletbereitstellung bis zum Einsatz des Brennstoffs zur energetischen Nutzung zu.

Inhalt

1	EINLEITUNG.....	1
1.1	Problemstellung	2
1.2	Zielsetzung.....	3
2	GRUNDLAGEN	5
2.1	Brennstofftechnische Anforderungen	5
2.1.1	Gesetzliche Vorgaben an den Brennstoffeinsatz	5
2.1.2	Brennstoffnormen und Qualitätssicherungssysteme.....	5
2.1.3	Nachhaltigkeitsanforderungen.....	9
2.1.3.1	Zertifizierung des Brennstoffs	9
2.1.3.2	Zertifizierung der Prozesskette	9
2.2	Charakterisierung des Holzes	10
2.2.1	Chemische Zusammensetzung.....	11
2.2.2	Brennstoffcharakterisierung	14
2.2.2.1	Abbrandverhalten.....	14
2.2.2.2	Brennstofftechnische Eigenschaften.....	15
2.2.2.3	Verbrennungsprodukte.....	17
2.3	Grundlagen der Agglomeration	19
2.3.1	Bindungsmechanismen und -formen	19
2.3.2	Einsatz und Wirkung ausgewählter Bindemittel	21
2.3.2.1	Normkonforme Bindemittel.....	22
2.3.2.2	Alternative Bindemittel und Verfahren	25
3	TECHNISCHE BESCHREIBUNG DER PROZESSKETTE.....	28
3.1	Rohstoffbereitstellung.....	28
3.2	Brennstoffproduktion.....	30
3.2.1	Aufbereitung.....	31
3.2.1.1	Lagern (nass) und Transport	31
3.2.1.2	Entrinden.....	31
3.2.1.3	Grobzerkleinerung (Nassvermahlung).....	32
3.2.1.4	Abscheiden.....	33
3.2.1.5	Trocknen	33
3.2.1.6	Lagern (trocken).....	35
3.2.2	Konditionierung.....	36
3.2.2.1	Feinzerkleinerung (Trockenvermahlung)	36
3.2.2.2	Mischen.....	36
3.2.2.3	Reifen.....	37
3.2.3	Pelletierung	38
3.2.3.1	Pressen	38
3.2.3.2	Kühlen.....	40
3.2.3.3	Sieben.....	41

3.2.4	Verladung	41
3.3	Distribution	41
3.3.1	Pellettransport und Lagerung	41
3.3.2	Risiken	43
3.4	Holzpelletnutzung	45
3.4.1	Pelletfeuerungsanlagen	45
3.4.2	Ascheanfall und Verschlackungsrisiko	47
4	VERSUCHSPLANUNG.....	49
4.1	Einflussoptionen auf die Brennstofffestigkeit während der Pelletproduktion.....	49
4.2	Systemgrenzen der Betrachtung	50
4.3	Ansatz der Analyse und Vorgehen	51
4.3.1	Charakterisierung der Einsatzstoffe.....	53
4.3.2	Pelletierbarkeit des Materials und Brennstofffestigkeit	53
4.3.3	Ascheschmelzverhalten	55
4.3.4	Einordnung der Brennstoffeigenschaften	55
4.4	Messtoleranzen und Datenunsicherheiten	55
5	VERSUCHSDURCHFÜHRUNG UND ERGEBNISSE	57
5.1	Anlagenbeschreibung	57
5.1.1	Rohmaterialbereitstellung.....	57
5.1.2	Brennstoffproduktion.....	58
5.1.2.1	Aufbereitung	58
5.1.2.2	Konditionierung	58
5.1.2.3	Pelletierung	58
5.1.2.4	Verladung.....	59
5.2	Charakterisierung der Einsatzstoffe.....	59
5.3	Pelletierbarkeit des Materials und Brennstofffestigkeit	60
5.3.1	Einfluss von Spantemperatur und –wassergehalt	61
5.3.1.1	1. Versuchsreihe.....	62
5.3.1.2	2. Versuchsreihe.....	62
5.3.2	Einfluss der Presstemperatur	63
5.3.2.1	1. Versuchsreihe.....	64
5.3.2.2	2. Versuchsreihe.....	66
5.3.3	Einfluss von Pellettemperatur und -wassergehalt.....	67
5.3.3.1	1. Versuchsreihe.....	67
5.3.3.2	2. Versuchsreihe.....	69
5.3.4	Fazit	71
5.4	Ascheschmelzverhalten	72
5.4.1	Spurenelementanalyse	72
5.4.2	Charakteristische Temperaturphasen.....	74
5.4.2.1	Rechnerische Bestimmung.....	75
5.4.2.2	Analytische Bestimmung.....	77

5.4.3	Fazit	78
5.5	Einordnung der Brennstoffeigenschaften	79
5.5.1	1. Versuchsreihe	80
5.5.2	2. Versuchsreihe	82
5.5.3	Fazit	84
6	EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE BRENNSTOFFEESTIGKEIT	85
6.1	Vorgehen.....	85
6.2	Identifizierung von Einflussfaktoren	86
6.2.1	Rohmaterialeigenschaften.....	86
6.2.2	Witterungsverhältnisse, Lagerbedingungen und Lagerdauer	88
6.2.3	Verunreinigungen, Störstoffe	88
6.2.4	Auswahl und Funktionalität technischer Verfahren und Aggregate.....	89
6.2.5	Lager- und Transportkonditionen sowie Umschlagshäufigkeit.....	90
6.2.6	Qualifikation der Akteure	91
6.2.7	Zusammenfassung	92
6.3	Bewertung der Einflussfaktoren auf die Brennstofffestigkeit	93
7	SCHLUSSBETRACHTUNG.....	97
7.1	Zusammenfassung der Erkenntnisse.....	97
7.2	Weiterführende Forschungsaktivitäten.....	99
	LITERATURVERZEICHNIS	101
	GLOSSAR.....	117
A	ANHANG	119
A.1	Technisches Rohstoffpotenzial zur Holzpelletproduktion.....	119
A.2	Kennwerte zur Rohstoffcharakterisierung.....	120
A.3	Internationale pelletrelevante Regelwerke	120
A.3.1	Brennstoffanforderungen.....	120
A.3.2	Weitere Bestimmungen	123
A.4	Versuchsprogramm und technische Daten der Pellettierversuche.....	125
A.4.1	Versuchsprogramm.....	125
A.4.2	Mess- und Analysedaten.....	126
A.5	Leitfaden zur Qualitätssicherung der Holzpelletbereitstellung	129
A.6	Thermochemische Konversion – Ablauf	131
A.7	Rahmenbedingungen zum Betrieb von Holzpellet-KFA in Deutschland.....	133
A.7.1	Anforderungen an die Luftreinhaltung	133
A.7.1.1	Gesetzliche Vorgaben	133
A.7.1.2	Gütezeichen, Richtlinien, und Normen.....	134
A.7.2	Anforderungen an die Ascheverwertung und -entsorgung.....	135
A.8	Funktionsweise von Pelletfeuerungsanlagen.....	136

Nomenklatur

Formelzeichen	Beschreibung	Einheit
BD	bulk density (Schüttdichte)	kg/m ³
D	Durchmesser	mm
DU	durebility (Mechanische Festigkeit)	-
Hs	Brennwert	MJ/kg
Hi	Heizwert	MJ/kg
L	Länge	mm
NO _x	Sickstoffoxide	mg/m _N ³
T	Temperatur	°C
TOC	Total Organic Content (Gesamtkohlenstoffgehalt, C _{ges})	mg/m _N ³
W	Wassergehalt	%
Griechische Symbole	Beschreibung	Einheit
Δ	Differenzwert	-
η	Wirkungsgrad	%
λ	Luftüberschuss	-
Indizes	Beschreibung	
add	additiv bestimmt	
BWL	Brennstoffwärmeleistung	
el	elektrisch	
max.	Maximum	
min.	Minimum	
N	Bezug auf Normzustand	
NWL	Nennwärmeleistung	
th	thermisch	
theor.	rechnerisch (theoretisch) ermittelter Wert	
waf	wasser- und aschefrei	
wf	wasserfrei	
Abkürzungen	Beschreibung	
BAFA	Bundesamt für Wirtschaft- und Ausfuhrkontrolle	
BImSchV	Bundesimmissionsschutzverordnung	
CEN/TS	„Technical Specification“; Vornorm der EN, z. T. auch prEN genannt	
CEN/TC 335	Zentrales Europäisches Normungskomitee für „Feste Biobrennstoffe“	
DIN /DIN CERTCO	Deutsches Institut für Normung / Gesellschaft für Konformitätsbewertung	
DIN <i>plus</i>	Zertifizierungsprogramm für Holzpellets von DIN CERTCO	
DT	deformation temperature (Ascheerweichungstemperatur)	
EN	Europäische Norm mit Gültigkeit in allen EU-Staaten	
EN <i>plus</i>	Zertifizierungsprogramm für Holzpellets des EPC	
EU	Europäische Union	
FT	flow temperature (Fließtemperatur; Ascheschmelzverhalten)	

Gew.-%	Gewichts-bezogener Anteil
GZ	Gütezeichen
HHS, HS	Holz hackschnitzel / Hackgut bzw. Hackschnitzel
HT (HAT)	hemisphere temperature (Halbkugeltemperatur; Ascheschmelzverhalten)
IRH	Industrierestholz (Späne, Rinde, Sparten etc.)
k. A.	keine Angaben
KFA	Klein- und Kleinstfeuerungsanlagen $\leq 50 \text{ kW}_{\text{NWL}}$
KS	Kartoffelstärke
KUP	Energieholzplantagen im Kurzumtrieb / Agroforstsysteme
LPH	Landschaftspflegeholz
MAP	Marktanreizprogramm (für erneuerbare Energien des BAFA)
Ma-%	Masse-bezogener Anteil
m. D.	mit Dampfkonditionierung
o. D.	ohne Dampfkonditionierung
PCDD/F	polychlorierte Dibenzo-p-dioxine (Dioxine) und Dibenzofurane
PHM	Presshilfsmittel (additives Bindemittel)
PM	particulate matter (Partikel-/ Feinstaubemissionen)
prEN (FprEN)	Europäische Vornorm im upgrading-Prozess zur EN
QS	Quellstärke
SB	Sinterbeginn-temperatur (Ascheschmelzverhalten)
SNP	Sägewerksnebenprodukte (z. B. Späne, Schwarten, Kappstücke)
SST	shrinking starting temperature (Schrumpftemperatur des Ascheprobekörpers)
ST	sperish temperature (Sphärischtemperatur des Ascheprobekörpers)
TA	Technische Anleitung (für Luftreinhaltung bzw. Abfall etc.)
TL	Teillastbetrieb
u. B.	unterhalb der Bestimmungsgrenze
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VL	Volllastbetrieb
VR	Versuchsreihe
Vol-%	Volumen-bezogener Anteil
wf	wasserfrei
WRH	Waldrestholz
WS	Weizenstärke

1 EINLEITUNG

Steigende Preise für fossile Rohstoffe und die politische Zielstellung aller EU-Staaten den Einsatz von erneuerbaren Energien zu unterstützen, attraktivierten in den 1990’er Jahren die Markteinführung eines neuen biogenen Festbrennstoffs. Dazu wurde die Pelletierung biogener Rohstoffe – eine bekannte Technik aus der Futtermittelindustrie – zur Herstellung von Holzpellets adaptiert /45/, /152/. Im Ergebnis dieser Entwicklung konnte innerhalb weniger Jahre eine Vielzahl an Pelletwerken in Europa errichtet werden. Allein in den Staaten der Europäischen Union (EU) betrug die Produktionskapazität der Holzpelletwerke Ende 2010 bereits knapp 15 Mio. t, in denen etwa 9 Mio. t Pellets produziert wurden. Das entspricht etwa 60 % des weltweiten Pellethandelsvolumens von rund 16 Mio. t /58/, /59/, /192/.

Die gegebenen standortbedingten Randbedingungen wie eine variierende Rohstoffbasis (z. B. Fichte, Kiefer, Douglasie), unterschiedliche Versorgungsstrukturen sowie regional und national gültige Rahmenbedingungen (Förderprogramme, Emissionsrichtlinien etc.) führten dazu, dass sich in Europa unterschiedlich ausgerichtete Pelletmärkte formierten (Abb. 1-1). So werden beispielsweise in Österreich, Deutschland und Italien Holzpellets vorrangig zur Wärmeversorgung in privaten Einzelfeuerstätten oder Zentralheizungsanlagen eingesetzt, während die Pelletnutzung in Heizwerken und kleinen Blockheizkraftwerken noch gering ist. In anderen EU-Ländern werden Holzpellets auch zur ausschließlichen Stromerzeugung in Kraftwerken oder zur gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung in Heizkraftwerken verwendet. In vielen osteuropäischen Ländern konnte sich die Holzpelletnutzung bisher kaum etablieren; sie produzieren primär für den Export nach Mittel- und Nordeuropa /1/, /45/, /155/, /260/.

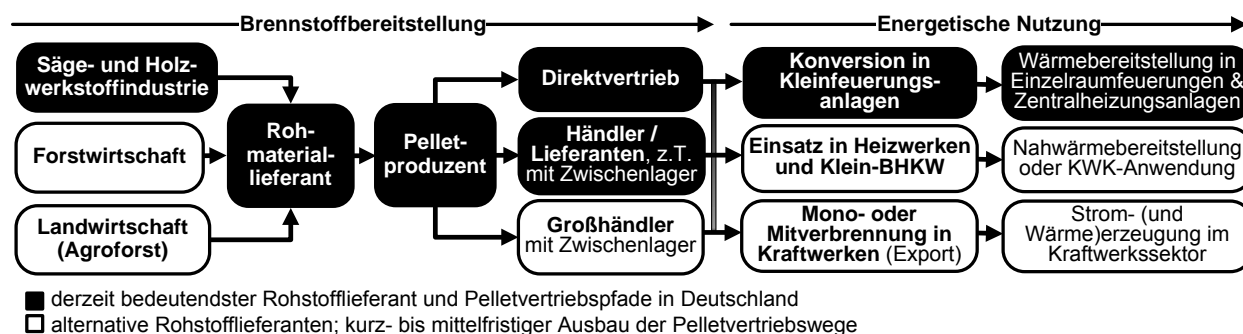


Abb. 1-1: Prozesskette unterschiedlicher Holzpelletrohstoff-, -vertriebs- und -nutzungspfade

Aufgrund der unterschiedlichen Nutzungsoptionen variieren die brennstofftechnischen Anforderungen an Holzpellets. Sie werden deshalb in unterschiedlichen Qualitätsklassen gehandelt /34/, /188/.

Generell zeichnen sich Holzpellets gegenüber anderen biogenen Festbrennstoffen durch eine hohe volumetrische Energiedichte aus, die auf den geringen Wasser- und Aschegehalt der Pellets zurückgeführt werden kann. Weiterhin weisen Holzpellets logistische Vorteile auf, da die hohe Schüttdichte, geringe Feinanteile und die gute Lagerstabilität der Pellets (mechanische Festigkeit) einen effektiven Brennstofftransport ermöglichen, gute Dosier- und Fließigenschaften sowie geringe Staubentwicklungen bei Umschlagsprozessen bewirken. Aufgrund der Rohstoffaufbereitungs- und Konditionierungsmaßnahmen während der Holzpelletproduktion ist ein Höchstmaß an Homogenität bezüglich der mechanisch-physikalischen und chemisch-stofflichen Brennstoffeigenschaften erreichbar. Damit besteht die Möglichkeit zur Standardisierung von Holzpellets entsprechend der Rohstoffherkunft und Brennstoffcharakteristik. Diesen vorteilhaften Brennstoffeigenschaften steht vor allem der Nachteil erheblich höherer Produktionskosten im Vergleich zu nicht bzw. nur einfach aufbereiteten Biomassebrennstoffen (z. B. Scheitholz oder Holz hackschnitzel) gegenüber /2/, /101/, /103/, /127/, /146/, /259/, /260/.

In Deutschland wurden 2011 rund 1,9 Mio. t Holzpellets produziert, wovon etwa 1,4 Mio. t in den rund 155 000 automatisch bestückten Pelletfeuerungsanlagen eingesetzt werden /100/. Bei

der überwiegenden Anzahl handelt es sich um Kleinst- und Kleinfeuerungsanlagen ($\leq 50 \text{ kW}_{\text{NWL}}$) in Form von Einzelraum- /Primäröfen oder zentralen Heizungskesseln (Abb. 1-2). In den letzten Jahren hat das Interesse an Pelletkesseln im mittleren ($> 50 \text{ kW}_{\text{NWL}}$) und höheren Leistungsbereich (bis $1 \text{ MW}_{\text{NWL}}$) zugenommen /32/, /100/, /215/.

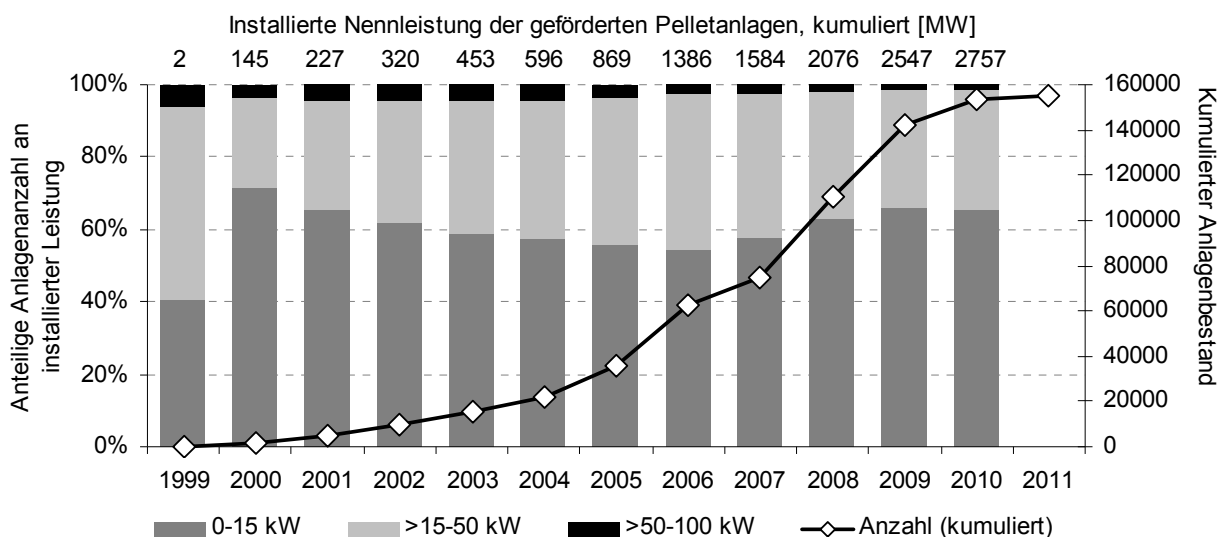


Abb. 1-2: Anlagenbestand an BAFA-geförderten Pelletfeuerungsanlagen in Deutschland einschließlich der Entwicklung der Nennwärmeleistung von Neuanlagen /8/

1.1 Problemstellung

In den Jahren 2006/07 stellten die zahlreichen Störfälle mit Verbackungen (Versinterung) und Verschlackungen im Feuerraum von Holzpelletkesseln eine Herausforderung für die Branche dar, die teilweise bis zum Kesselausfall führten. Die Ursache dieser Probleme konnte häufig nicht eindeutig identifiziert werden /10/, /259/.

Die betroffenen Feuerungsanlagen entsprachen dem Stand der Technik; jedoch waren Kessel mit Unterschubfeuerung weniger betroffen als Abwurfffeuerungen /254/. Nach Auswertung der Laboranalysen von etwa 200 auffälligen Brennstoffproben entsprachen 90 % dem in Deutschland gültigen Qualitätsstandard für Holzpellets – der DINplus /55/. Ein ähnliches Bild zeigten die Erkenntnisse aus den Untersuchungen in Österreich nach der vergleichbaren ÖNorm M 7135 /66/. Die Ursachenforschung führte zu unterschiedlichen Erklärungsansätzen:

- Da Holz als traditioneller Rohstoff bekannt ist und bei der Verbrennung in Hausbrandanlagen üblicher Weise keine vergleichbaren Probleme auftreten, fiel der Verdacht auf die zunehmende Verwendung von Presshilfsmitteln bei der Holzpelletierung als mögliche Auslöser der Verschlackungsprobleme. Als ein Indiz dafür galt, dass stärkehaltige Presshilfsmittel einen niedrigeren Ascheschmelzpunkt als Holz besitzen /254/.
- Eine andere Theorie besagte, dass die aus der Pelletlänge und der Brennstofffestigkeit resultierende Schüttdichte Einfluss auf die Verbrennungstemperatur in der Feuerstätte nimmt und es deshalb überwiegend bei kurzen Pellets zu höheren Glutbetttemperaturen kommen kann. Die Zwischenräume des Schüttguts werden durch sehr kurze Pellets oder loses Material (Feinanteil) verfüllt, so dass die freigesetzten Flüchtigen nicht schnell genug ausströmen können. Die Gase aus der pyrolytischen Zersetzung zünden dadurch bereits im Glutbett und lassen die Glutbetttemperaturen deutlich steigen. Lange Verweilzeiten der Asche im Brennraum und hohe Verbrennungstemperaturen können eine Verschlackung weiter begünstigen /199/.
- Andere Erklärungsversuche führten die regional eingrenzenden und saisonal aufgetretenen Störfälle auf die parallele Ausweitung der Pelletproduktionsstandorte in Europa zurück.

Neue Pelletwerke werden nicht mehr nur im forstwirtschaftlich geprägten Süddeutschland, sondern bis weit in den Norden errichtet. Dadurch steigt die Nachfrage nach Säge- und Hobelspänen im Markt, weshalb in einigen Pelletwerken anteilig auch Frischhölzer zum Einsatz kommen. Über deren Herkunft ist nur wenig bekannt. Vermutet wurde, dass Hölzer von kritischen Aufwuchsorten (z. B. Sandböden) einen höheren Silizium-Gehalt aufweisen und somit die Ascheschmelztemperatur der Pellets senken. Ebenso können aber auch Verunreinigung des Rohmaterials dazu führen /10/.

Eine definierte Brennstoffqualität stellt somit eine wesentliche Anforderung für den Einsatz von Holzpellets in Kleinf Feuerungsanlagen (KFA) dar. Nach Auswertung mehrerer Branchenumfragen bei Betreibern von Pelletfeuerungsanlagen, Pelletproduzenten, -händlern, Kesselherstellern und Installateuren werden immer wieder Mängel an der Brennstoffqualität als eine der Hauptursachen für Betriebsstörungen und schlechten Erfahrungen mit Pelletheizungsanlagen genannt (Abb. 1-3). Ebenfalls kritisch werden die Brennstofflager und -fördersysteme beurteilt, wobei die technischen Probleme vor allem auf die Zufuhrschnecke(n), die mangelnde Brennstoffqualität oder auf pneumatische Systeme zwischen Pelletlager und Kesselvorratsbehälter zurückgeführt werden /126/, /170/, /215/, /216/. Als wesentliches Qualitätskriterium gilt die Brennstofffestigkeit, die sowohl die Pelletlogistik als auch die Verbrennung der Pellets beeinflussen kann /2/.

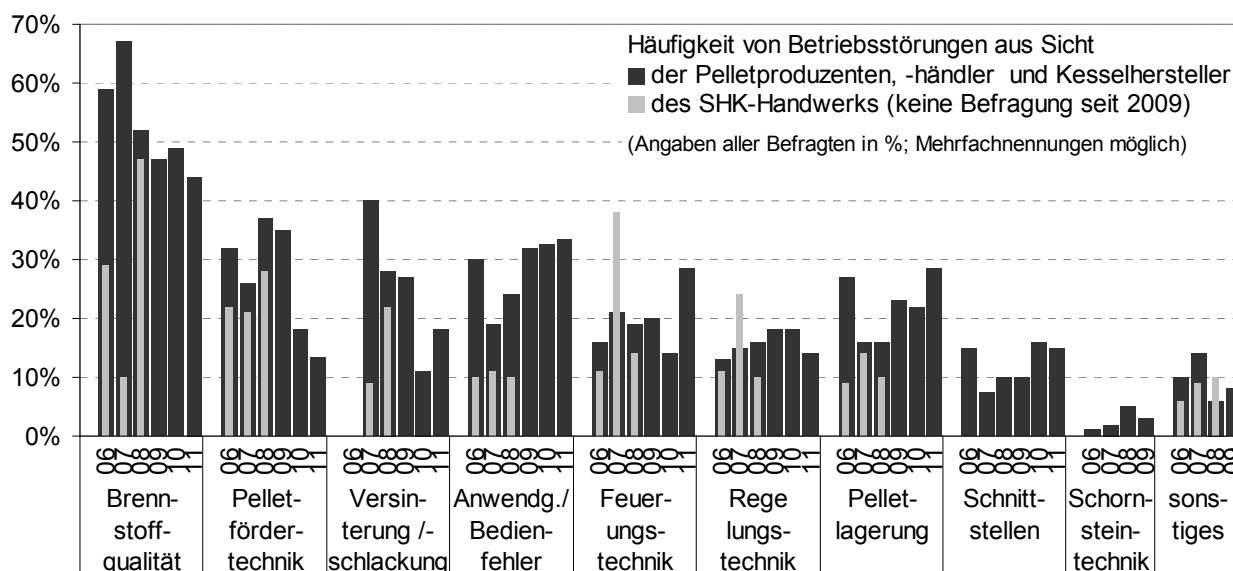


Abb. 1-3: Branchenumfrage zu Betriebsstörungen und schlechten Erfahrungen mit Pelletheizungsanlagen in den Jahren 2006 bis 2011 (SHK... Sanitär-Heizung-Klima) /170/, /171/, /215/, /216/

1.2 Zielsetzung

Damit kommt bei der Holzpelletproduktion der Brennstoffqualität und insbesondere dem Brennstoffparameter der Pelletfestigkeit eine hohe Bedeutung zu, da diese sowohl die Transport- und Lagerbedingungen des Brennstoffs als auch dessen Abbrandverhalten beeinflusst.

Vor diesem Hintergrund ist es das Ziel der Arbeit eine systematische Prozesskettenanalyse der Holzpelletbereitstellung unter Einbeziehung theoretischer und praktischer Untersuchungen durchzuführen. Im Fokus der Untersuchung stehen die Identifikation von kritischen Einflussfaktoren auf die Brennstofffestigkeit und dabei der Bindemittelsatz bei der Produktion von Holzpellets für KFA.

Ausgehend von dieser übergeordneten Zielstellung untergliedert sich die Arbeit in folgende Teilziele, die gleichzeitig auch die Kapitelstruktur der Arbeit entsprechen (Abb. 1-4):

- i. *Zusammenstellung der Grundlagen.* Definition der Brennstoffanforderungen an Holzpellets zum Einsatz in KFA und Charakterisierung der Einsatzstoffe zur Pelletierung einschließlich

- ihrer Brennstoffeigenschaften; Darstellung der Wirkungsmechanismen natürlicher und additiver Bindemittel während des Agglomerationsprozesses (Kapitel 2)
- ii. *Prozesskettenbeschreibung*. Technische Beschreibung der Prozesskette der Pelletbereitstellung vom Rohmaterialinput zur Pelletierung über die Brennstoffproduktion und -distribution bis hin zum Einsatz der Pellets zur Wärmebereitstellung (Kapitel 3)
- iii. *Versuchsplanung*. Ableitung von Einflussmöglichkeiten auf die Brennstofffestigkeit von Holzpellets beim Pelletieren (i) und Identifikation von Prozessparametern zur Beeinflussung der Bindungskräfte (ii); Planung der Pelletierung von Versuchsbrennstoffen unter Zusatz ausgewählter Bindemittel und Konditionierungsmaßnahmen (Kapitel 4)
- iv. *Versuchsdurchführung und Ergebnisse*. Produktion von Versuchsbrennstoffen an einer kommerziellen Anlage unter Praxisbedingungen; Aufnahme von prozessspezifischen Kennwerten während der Pelletierung; brennstofftechnische Analyse der Versuchsbrennstoffe einschließlich ihrer Verschlackungsneigung (Kapitel 5)
- v. *Ergebnisinterpretation*. Identifikation und Einordnung von Einflussfaktoren auf die Holzpelletbereitstellung entlang der gesamten Prozesskette unter Einbeziehung der Erkenntnisse aus den theoretischen Betrachtungen (i, ii, iii) und den praktischen Untersuchungen (iv); Bewertung der Einflussfaktoren auf die Brennstofffestigkeit hinsichtlich ihrer natürlichen / rohstoffbedingten, technischen und managementbedingten Einflussoptionen (Kapitel 6)

Ausgehend von den Ergebnissen der Teilziele schließt die Arbeit mit einer zusammenfassenden Betrachtung und einem Ausblick auf weiterführende Forschungsaktivitäten ab (Kapitel 7).

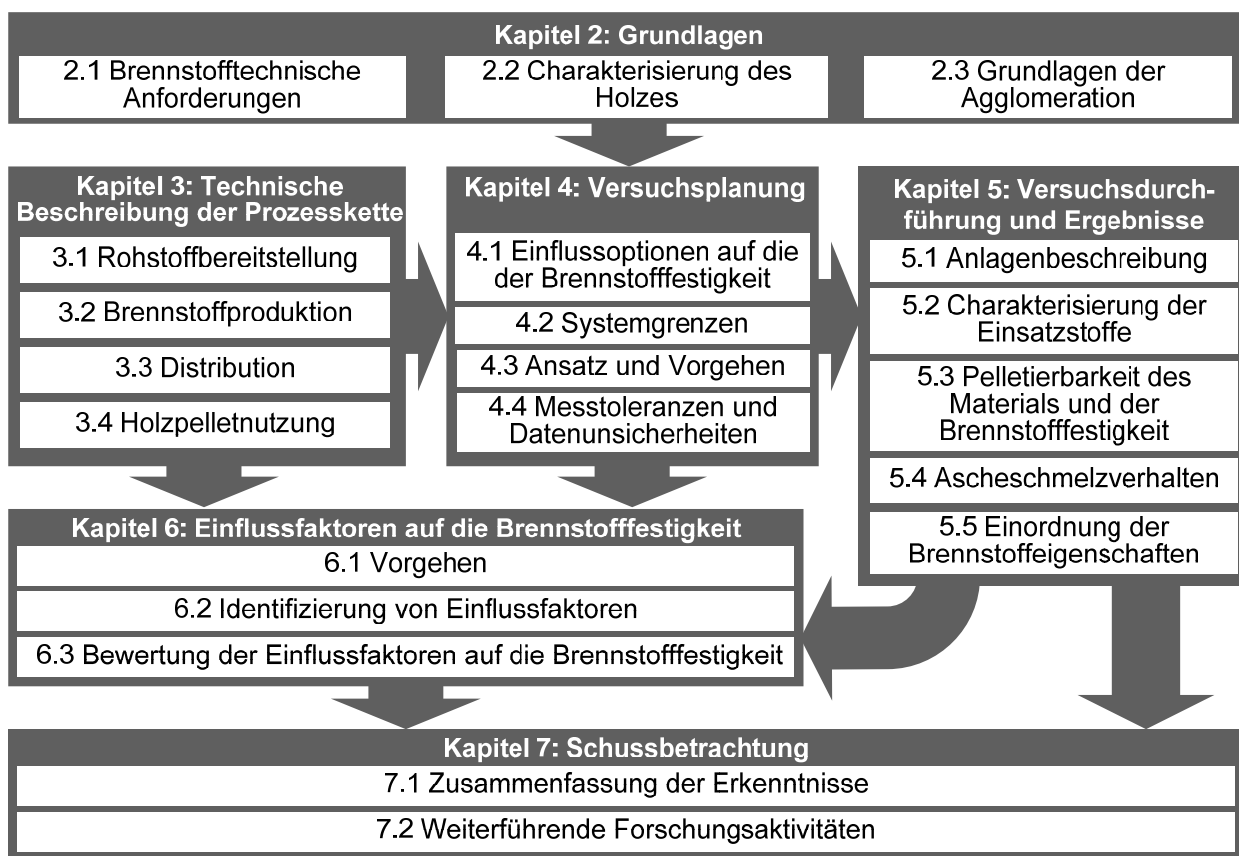


Abb. 1-4: Aufbau der Arbeit und Schnittstellen zwischen den Kapiteln

2 GRUNDLAGEN

In Deutschland werden derzeit etwa 33 PJ Holz zur Pelletproduktion eingesetzt, wobei es sich fast ausschließlich um inländische Nadelholzsortimente handelt /100/. Potenziell wäre ein Anstieg der Holzpelletproduktion um das Drei- bis Vierfache möglich, ohne die Nachhaltigkeit der Ressourcennutzung zu gefährden und ohne die Einbeziehung von Agroforstsystemen. Allerdings sinkt mit der zunehmenden Nachfrage die Verfügbarkeit preisgünstiger Rohstoffkontingente am Markt und die Konkurrenz zur stofflichen und anderweitigen energetischen Nutzung steigt (Anhang, Kapitel A.1).

Bei der Produktion von Holzpellets zum Einsatz in KFA ist die Auswahl der Rohmaterialien zur Pelletierung von den gesetzlichen Anforderungen beschränkt und parallel dazu sind bestimmte Brennstoffeigenschaften von Produktnormen limitiert. In Kapitel 2.1 werden deshalb zunächst die Randbedingungen der Pelletproduktion vorgestellt, deren Kenntnis die Grundlage jeden Pelletierers ist. Eine weitere Voraussetzung für die Pelletherstellung stellt die Einordnung und Charakterisierung der verfügbaren Rohstoffbasis dar. Deshalb wird in Kapitel 2.2 auf die chemische Zusammensetzung unterschiedlicher Hölzer und Holzsortimente sowie deren Einfluss auf spezifische Brennstoffeigenschaften und das Abbrandverhalten eingegangen. Neben dem Holzrohmaterial werden zur Pelletierung unterschiedliche Bindemittel eingesetzt. Deren Wirkungseffekte und Praxisrelevanz präsentiert Kapitel 2.3.

2.1 Brennstofftechnische Anforderungen

2.1.1 Gesetzliche Vorgaben an den Brennstoffeinsatz

Die Genehmigung einer Feuerungsanlage ist auf spezifische Einsatzstoffe limitiert, deren Brennstoffanforderungen – zumindest im kleinen und mittleren Leistungsbereich – in der Regel auf etablierte Produktnormen abgestimmt sind. Für den Einsatz von Holzpellets in Feuerungsanlagen bis 1 MW_{NWL} sind die Anforderungen der 1. Bundesimmissionsschutzverordnung (BImSchV) maßgeblich, in der sowohl die Emissionsgrenzwerte für den Anlagenbetrieb (Anhang, Tabelle A-10), als auch die brennstofftechnischen Anforderungen an die einzusetzenden Pellets definiert sind. Konkret wird bezüglich der Brennstoffanforderungen an Holzpellets auf nationale Brennstoffnormen oder Brennstoff-Zertifizierungsprogramme (Kapitel 2.1.2) bzw. auf vergleichbare Brennstoffqualitäten auf Basis naturbelassenen Holzes verwiesen¹. Weiterhin dürfen laut 1. BImSchV bei der Herstellung von Presslingen aus Holz nur Bindemittel aus Stärke, pflanzlichem Stearin, Melasse und Cellulosefasern verwendet werden /18/, /19/.

Hinsichtlich einer effizienten und emissionsarmen Verbrennung von Holzpellets in KFA und den daraus resultierenden Anforderungen an den Anlagenbetrieb sowie die fachgerechte Ascheentsorgung werden in Anhang, Kapitel A.7 geltende Richtlinien und Normen vorgestellt.

2.1.2 Brennstoffnormen und Qualitätssicherungssysteme

Ende der 1990'iger Jahre wurden parallel zur Installation der ersten Pelletfeuerungsanlagen in Schweden, Österreich und Deutschland nationale Produktnormen für Holzpresslinge entwickelt, in denen wichtige brennstoffspezifische Eigenschaften anhand von Grenzwerten definiert sind (Abb. 2-1) /45/, /110/, /142/. Andere europäische Staaten haben diese Produktnormen übernom-

¹ Aufgrund der periodischen Anpassung der 1. BImSchV (Verschärfung der Emissionsanforderungen; Anhang, Tabelle A-10), die unabhängig von der Erarbeitung von Brennstoffstandards erfolgt (Kapitel 2.1.2, wird im Gesetzestext häufig nicht auf die aktuell geltende Brennstoffnorm/-zertifizierungsprogramm verwiesen. So bezog sich die 1. BImSchV aus dem Jahr 1988 noch auf die DIN 51731 von 1993, in der 1. BImSchV aus dem Jahr 2007 wird auf die DIN_{plus} von 2004 Bezug genommen und in der 1. BImSchV aus dem Jahr 2010 erfolgt der Verweis auf das DIN_{plus}-Zertifizierungsprogramm von 2007 (und nicht auf die Überarbeitung aus dem Jahr 2010 bzw. der in 2011 in Kraft getretenen DIN EN 14961-2). Dadurch, dass mit der Überarbeitung der Brennstoffnormen zum Teil auch die Prüfnormen adaptiert oder neu aufgestellt werden, stellt die Sicherstellung der in der 1. BImSchV als Option wählbaren „gleichwertigen Holzpelletqualitäten“ eine Herausforderung dar.

men oder angepasst (z. B. DIN 51731 in der Schweiz: SN 166000; SS 187120 in Norwegen: NS 3165) /52/. Die regelmäßige Überprüfung der Einhaltung der Produktnormen und die Qualitätssicherung der Brennstoffeigenschaften können Zertifizierungsprogramme übernehmen, wie beispielsweise die Systeme „ÖNORM M 7135 geprüft“ oder „DINplus“². Beide Regelwerke stellen heute nahezu identische Qualitätsanforderungen an Holzpellets und haben inzwischen in Europa, und teilweise darüber hinaus, eine hohe Akzeptanz und Marktpräsenz erreicht (Stand Oktober 2009: >150 zertifizierte Betriebe, entspricht etwa 30 % aller Pelletwerke in Europa) /42/, /90/, /156/. Anderswo werden die Brennstoffkennwerte von Holzpellets in Form von Labels oder Prüfkennzeichen präsentiert (z. B. „Pellet Gold“ in Italien, „NF 434“ in Frankreich). Deren Prüf- und Überwachungspflichten unterscheiden sich jedoch wesentlich von den etablierten Zertifizierungsprogrammen in Deutschland und Österreich /54/, /24/, /5/. Deshalb empfehlen bzw. verweisen viele europäische Hersteller kleiner und mittlerer Pelletfeuerungsanlagen auf die Verwendung zertifizierter Holzpellets nach DINplus bzw. „ÖNORM M 7135 geprüft“. Häufig stellt dies sogar eine Voraussetzung für die Gewährleistung eines kontinuierlichen und emissionsarmen Anlagenbetriebs dar, obwohl die Nutzung zertifizierter Brennstoffe aus Sicht des Gesetzgebers nicht verpflichtend ist. Kessel- und Ofenhersteller nutzen jedoch diese Regelwerke, um die Basisanforderungen an die Brennstoffqualität für den Anwender zu definieren.

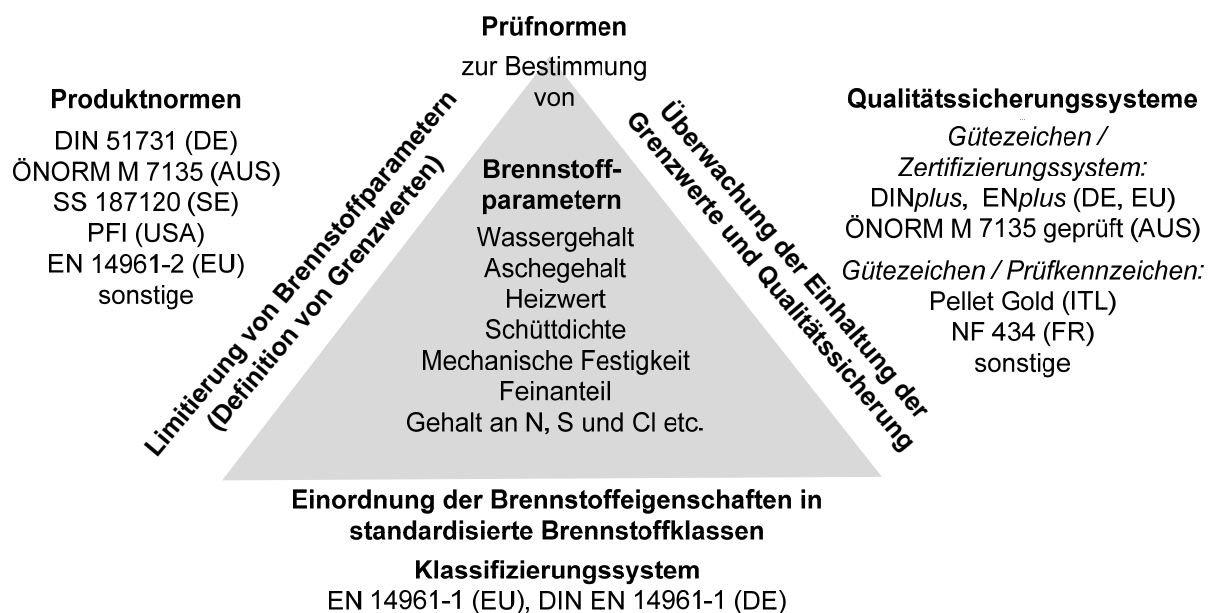


Abb. 2-1: Unterscheidung von Regelwerken zur Charakterisierung biogener Festbrennstoffe nach Klassifizierungssystem, Prüfnormen, Produktnormen und Qualitätssicherungssystemen

International anerkannte Brennstoffnormen bieten eine gute Chance den grenzüberschreitenden Handel in dem weltweit wachsenden Markt zu erleichtern und damit die Konkurrenzfähigkeit biogener Festbrennstoffe zu erhöhen. Weiterhin kann das Kundenvertrauen in den Brennstoff durch eine höhere Markttransparenz gestärkt und neuen Akteuren der Einstieg in die Branche erleichtert werden /183/, /252/.

Eine Übersicht international bekannter brennstofftechnischer Anforderungen an Holzpellets für den Einsatz in KFA bieten die Regelwerke im Anhang, Tabelle A-3. Zusätzlich sind im Anhang, Tabelle A-4 Produktnormen und Gütezeichen für Holz- und Nicht-Holzpellets zum Einsatz in Feuerungsanlagen im höheren Leistungsbereich aufgeführt. Nachfolgend wird nur eine Auswahl der aktuell relevanten Regelwerke mit Bezug zur Arbeit vorgestellt.

² Das Zertifizierungsprogramm „DINplus: Holzpellets zur Verwendung in Kleinf Feuerstätten“ stellt seit 2004 eine Erweiterung von „DIN 51731 geprüft“ dar und vereint seit der Überarbeitung im Jahr 2007 die wichtigsten Produktnormen der ÖNORM M 7135 (HP1) und der DIN 51731 (HP5).

- **CEN-Normen.** Aufgrund der o. g. Argumente beauftragte die Europäische Kommission Ende der 1990er Jahre das Europäische Normungsinstitut CEN mit der Entwicklung europäischer Normen für biogene Festbrennstoffe. In rund 10 Jahren wurden vom Technischem Komitee „CEN/TC 335 Solid Biofuels“ etwa 30 Produkt- und Qualitätsnormen sowie Prüf- und Terminologienormen entwickelt, die teilweise noch den Status europäischer Vornormen tragen, ab dem Jahr 2009 jedoch sukzessiv als Europäische Norm (EN) verfügbar werden (Abb. 2-2, Anhang Tabelle A-5) /111/.



Abb. 2-2: Systematisierung relevanter EU-Normen für die Charakterisierung von Holzpellets

- *EN 14588.* In der Norm werden die Begrifflichkeiten der TC 335-Normenserie definiert.
- *EN 14961.* Als eine der ersten dieses Normungspaketes trat im Frühjahr 2010 die EN 14961-1 „Feste Biobrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen“ in Kraft. Damit ist für nahezu jeden biogenen Festbrennstoff eine Identifikation der Rohstoffherkunft, eine Klassifizierung der Brennstoffform und Kategorisierung relevanter Brennstoffeigenschaften zur Einordnung und dem Vergleich aufgeführt /39/. Die Teile 2 bis 6 der EN 14961 beschreiben Produktnormen für den nicht-industriellen Brennstoffeinsatz, unter anderem auch für Pellets (Abb. 2-2).

In der EN 14961-2 werden für Holzpellets drei Brennstoffklassen definiert, die sich in den einsetzbaren Rohstoffen, den zulässigen Grenzwerten für den Aschegehalt, dem Heizwert, Stickstoff- und Chlorgehalt unterscheiden (Anhang, Tabelle A-3). Weiterhin sind in dem Standard mehrere Grenzwerte für Schwermetalle aufgeführt, die den Einsatz von chemisch behandeltem Holz zur Pelletproduktion ausschließen (Klassen A1 und A2) bzw. auf minimale Verunreinigungsmengen begrenzen (Klasse B). Der Einsatz von Additiven zur Pelletierung ist auf maximal 2 % begrenzt. In der Norm werden keine konkreten Anforderungen an das Ascheschmelzverhalten von Holzpellets aufgeführt, dennoch sollen die verfügbaren Analysewerte der charakteristischen Ascheschmelztemperaturen dokumentiert werden. Für Brennstoffanalysen zur Einordnung der Produkteigenschaften müssen die entsprechenden europäischen Prüfnormen herangezogen werden /188/. Die Umsetzung der EN 14961-2 in einen nationalen Standard erfolgte 2011 (DIN EN 14961-2) und ersetzt damit die DIN 51731 sowie den Bezug in der 1. BImSchV hinsichtlich der brennstofftechnischen Anforderungen an Holzpellets das *DINplus*-Zertifizierungsprogramm (Ausgabe August 2007) heranzuziehen.

- *Prüfnormen.* Die Prüfnormen zur Beurteilung der Brennstoffeigenschaften beinhalten erstmals EU-weit einheitliche Mess- und Analysemethoden zur Bestimmung der brennstoffspezifischen Kennwerte (z. B. Wassergehalt EN 14774-1 und -2, Aschegehalt EN 14775 oder Mechanische Festigkeit EN 15210-1, Anhang Tabelle A-5) /6/, /53/.
- *EN 15234.* Analog zur EN 14961 wurde mit der EN 15234 ein Multipartstandard zur Qualitätssicherung für biogene Festbrennstoffe entlang der gesamten Bereitstellungskette entwickelt, der seit 2011 sukzessiv in Kraft tritt. Die auf Holzpellets abgestimmte EN 15234-2 stellt die Qualitätssicherung des Brennstoffs von der Rohstoffbereitstellung über die Pelletproduktion und dem Transport bis zur Auslieferung an den Endkunden sicher. Die transparente Dokumentation des Brennstofflebensweges soll das Kundenver-

trauen in das Produkt stärken und zur internen Qualitätsverbesserung beitragen. Darum werden u. a. folgende Informationen belegt:

- Brennstoffherkunft und Produktionsparameter während der Brennstoffherstellung,
 - beteiligte Akteure während der Brennstoffbereitstellung sowie die Brennstoffübergabekonditionen /190/, /191/.
- **ISO-Normen.** Parallel zur Entwicklung und Markteinführung der europäischen Normen verfolgt die „International Organisation for Standardisation“ (ISO) mit der Gründung des Technischen Komitee „ISO/TC 238 Solid Biofuel“ im Jahr 2007 das Ziel, die in der EU und anderswo gültigen Normen für biogene Festbrennstoffe in den kommenden Jahren international zu vereinheitlichen. Die Veröffentlichung erster Regelwerke ist für 2011 / 2012 geplant /90/. Diese werden voraussichtlich methodisch und inhaltlich an die europäischen CEN-Normen angelehnt und weiterentwickelt.
 - **ENplus-Zertifizierung.** Mit der Einführung des EN-Normungspaketes für biogene Festbrennstoffe in nationale Bestimmungen wurde 2009/10 das Zertifizierungssystem ENplus für den deutschen und österreichischen Pelletmarkt entwickelt. Auf Basis der EN 14961-2 werden Holzpellets in drei Brennstoffklassen (A1, A2, B) unterteilt und in einem Handbuch zur Qualitätssicherung des Brennstoffs entlang der Bereitstellungskette die Vorgaben der EN 15234(-2) für Pelletproduzenten und Händler integriert. Die brennstofftechnischen Anforderungen unterscheiden sich von der EN 14961-2 lediglich bei der Rohstoffzulassung (kein Einsatz von Rinde in Pelletklasse A2) und den normativen Vorgabe an die Aschecharakterisierung (Aschegehalt, -schmelztemperaturen) des Brennstoffs.

Neu am ENplus-Zertifizierungssystem ist, dass damit die Produktqualität bis zur Auslieferung an den Endverbraucher überwacht wird. Neben der Qualitätssicherung soll die Integration eines Marktmonitorings Möglichkeiten für eine Erhöhung der Versorgungssicherheit bieten. Zusätzlich wird dazu angehalten, Rohstoffe aus nachhaltiger Forstwirtschaft zur Pelletproduktion zu verwenden und deren tatsächlichen Anteil einschließlich dessen Herkunft zu dokumentieren (Kapitel 2.1.3). Das Zertifizierungssystem wurde 2010 in Deutschland und 2011 in Österreich eingeführt und soll in den nächsten Jahren auf weitere EU-Staaten ausgedehnt werden /11/.

- **DINplus-Zertifizierung.** Die brennstofftechnischen Anforderungen an Holzpellets im Rahmen der DINplus des Ausgabejahres 2007 (s. o.) wurden im Jahr 2010 dem CEN-Standard der EN 14961-2, der Holzpelletklasse A1 angepasst. Die Anforderung an den Holzeinsatz ist von nur „100 % naturbelassenes Holz“ zu verwenden, weiter konkretisiert worden zu: „nur 100 % naturbelassener Rohstoff zugelassen; wenn Verunreinigung mit Leim nicht auszuschließen ist, muss eine prozessbezogene Stickstoffprüfung durchgeführt werden“ /43/. Hinsichtlich des Bindemittelsatzes zur Pelletierung gab es bereits 2007 die Mengenbeschränkung auf maximal 2 % PHM (massebezogen) und den Zusatz: „Chemisch nicht veränderte Produkte aus der primären land- und forstwirtschaftlichen Biomasse (solche sind z. B. Maisschrot, Maisstärke, Roggenmehl), die – aus Gründen der Erleichterung des Pressvorganges und damit auch der Verbesserung der Energiebilanz sowie zur Erhöhung der Abriebfestigkeit - dem Ausgangsmaterial zur Erzeugung von Holz- oder Rindenpresslingen beigemischt werden dürfen.“ /42/.

Im Unterschied zu ENplus umfasst das DINplus-Gütezeichen nur die Überwachung der Brennstoffqualität herstellerseitig. Es bietet jedoch keine Qualitätssicherung bis zum Endkunden. Allerdings ist die Zertifizierung von Logistikfachbetrieben und Brennstofflagerräumen im Rahmen separater DIN-Zertifizierungsprogramme möglich.

- **Blauer Engel-Zertifizierung.** Das Umweltzeichen „Blauer Engel“ (RAL UZ 153) kann von Holzpelletproduzenten und -händler seit Anfang 2011 beantragt werden. Bei den Qualitätsanforderungen an Holzpellets wird ebenfalls auf die EN 14961-2, Klasse A1 Bezug genom-

men. Darüber hinaus muss die Herkunft des Rohmaterials belegbar sein und weitere Nachhaltigkeitsanforderungen erfüllt werden (Kapitel 2.1.3.1) /198/.

2.1.3 Nachhaltigkeitsanforderungen

Der Begriff der Nachhaltigkeit kann bis Anfang des 18. Jahrhunderts zurückverfolgt werden, wo er das Konzept für eine planmäßige, dauerhaft produktive und schonende Bewirtschaftung der Wälder beschrieb. Ende des 20. Jahrhundert werden Nachhaltigkeitskriterien an nahezu alle Branchen der Gesellschaft gestellt, wobei sowohl ökonomische, ökologische und soziale Komponenten heranzuziehen sind /98/, /244/. Bei der methodischen Erfassung und quantitativen Beschreibung des Nachhaltigkeitscharakters eines Produktes oder Prozesses bestehen jedoch noch Unsicherheiten.

Während die rohstoffseitige Einschätzung der Nachhaltigkeit von Holzpellets noch relativ überschaubar ist (Kapitel 2.1.3.1), stellt die Bewertung der gesamten Prozesskette (von der Rohmaterialbereitstellung zur Pelletierung bis zur Wärmeerzeugung und Ascheentsorgung) eine größere Herausforderung dar. In den letzten Jahren wurden dazu verschiedene Ansätze und Kriterien entwickelt (Kapitel 2.1.3.2).

2.1.3.1 Zertifizierung des Brennstoffs

In Deutschland sind mehr als 70 % und in der EU mehr als 50 % der Waldfläche gemäß „Programme for the Endorsement of Forest Certification Schemes (PEFC)“ und des „Forest Stewardship Council (FSC)“ zertifiziert /65/, /176/. Da zur Pelletproduktion vorwiegend Resthölzer aus regionalen Sägewerken oder aus Unternehmen der Holzbe- und -verarbeitung eingesetzt werden, die in der Regel heimische oder europäische Holzsortimente nutzen, kann bei dem überwiegenden Teil der in Deutschland produzierten Pellets davon ausgegangen werden, dass das dafür verwendete Rohmaterial von Bäumen zertifizierter Forstflächen stammt /262/.

Seit kurzem wird im Rahmen der Vergabe von einigen Holzpellet-Gütezeichen (Kapitel 2.1.2) bereits der Nachweis der nachhaltigen Holzherkunft verlangt oder / und Anforderungen an eine Treibhausgasbilanzierung der Pelletproduktion gestellt. Während bei der EN*plus*-Zertifizierung eine jährliche Informationspflicht über die Herkunft des gesamten Rohmaterials einschließlich des Anteils an PEFC / FSC-zertifizierter Ware festgeschrieben ist, besteht beim „Blauen Engel“ nur eine Nachweispflicht für die Ware, die nicht aus Industrieresthölzern hergestellt wird /34/, /198/. Für die mit dem Blauen Engel gekennzeichneten Holzpellets dürfen zur Spantrocknung jedoch nur regenerative Energien oder industrielle Abwärme eingesetzt werden. Zusätzlich müssen die äquivalenten CO₂-Emissionen der gesamten Pelletbereitstellung (einschließlich der Rohmaterialbeschaffung und Pelletauslieferung) sowie die entstandenen Staubemissionen der Pelletierung überwacht werden³ /198/. Vergleichbare Bilanzgrenzen zieht auch das vom TÜV Rheinland entwickelte Label des „Carbon-Footprint“, bei dem eine CO₂-Bilanzierung der Pelletbereitstellung in Anlehnung an die DIN EN ISO 14044 vorliegen muss /94/. Bei keinem der Gütezeichen existieren bisher konkrete Emissionsgrenzwerte /168/.

2.1.3.2 Zertifizierung der Prozesskette

Die Renewable Energy Directive (RED) ist die europäische Richtlinie 2009/28/EG zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen. Erstmals werden darin konkrete ökologische Kriterien definiert, die sicherstellen sollen, dass bei der Berechnung der Zielerfüllungsquote zur Nutzung erneuerbarer Energien jeden einzelnen Landes ein Mindestmaß an Treibhausgaseinsparungen erreicht wird. Besonders kritisch werden dabei Landnutzungsänderungen durch den Anbau von Energiepflanzen bewertet /206/. Die Umsetzung der EU-Richtlinie in nationales Recht erfolgte 2009 im Rahmen der Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung (BioSt-NachV) für flüssige Biobrennstoffe und der Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung (BioKraft-NachV),

³ Der Nachweis der Treibhausgasemissionen wird ab 2012 auch bei EN*plus* Pflicht /34/.

deren Fokus sich jedoch ausschließlich auf die Biokraftstoffproduktion bzw. den Einsatz von flüssigen Bioenergieträgern zur Stromproduktion bezieht /20/, /21/.

Somit stellen bisher weder die RED noch die in Deutschland geltenden Nachhaltigkeitsverordnungen geeignete Instrumente für den Nachweis einer nachhaltigen Holzpelletnutzung in KFA dar. Dennoch bietet die RED die Chance nationale Förderinstrumente (z. B. das Marktanreizprogramm des BAFA) gezielter auf effiziente und innovative Anwendungstechniken auszurichten, indem die darin empfohlenen Umwandlungswirkungsgrade für die biogene Wärme-, Kälte- oder Stromerzeugung als Mindestanforderungen übernommen werden. Für den Einsatz von Biomasse in Wohngebäuden bedeutet dies einen Konversionswirkungsgrad der Anlage von $\geq 85\%$ und bei der industriellen Nutzung werden mindestens $\geq 70\%$ angeregt /206/.

An der Erarbeitung von allgemein anerkannten und international verbindlichen Nachhaltigkeitskriterien für die energetische Biomassenutzung arbeiten auch die Standardisierungskomitees CEN/TC 383 und ISO/TC 248. Bis es soweit ist, hat die Europäische Kommission Anfang 2010 beschlossen, vorerst keine weiteren Nachhaltigkeitsanforderungen an den Einsatz fester und gasförmiger Bioenergieträger zur Wärme-, Kälte- oder Stromerzeugung zu stellen /48/.

Parallel zur Entwicklung der internationalen Normen haben sich mehrere europäische Kraftwerksbetreiber (IWPB⁴) zusammengeschlossen, um einen konzernübergreifenden Nachhaltigkeitsstandard mit definierten Anforderungen für die Nutzung von Industriepellets zur Strom- und Wärmebereitstellung zu entwickeln. Darin sollen auch Kriterien zur Einschätzung von indirekten Landnutzungsänderungen (ILUC) beim Rohstoffanbau verankert werden /213/, /223/.

2.2 Charakterisierung des Holzes

Biogene Festbrennstoffe können unterschiedlicher Herkunft sein (Abb. 2-3). Anhand der Spezifizierung der Rohstoffquelle nach DIN EN 14961-1 lassen sich alle potenziellen Holzsortimente einordnen, die als Haupt- oder Nebenprodukt bzw. als Abfall in der Land- und Forstwirtschaft, der industriellen Weiterverarbeitung oder am Ende einer Nutzungskette anfallen.

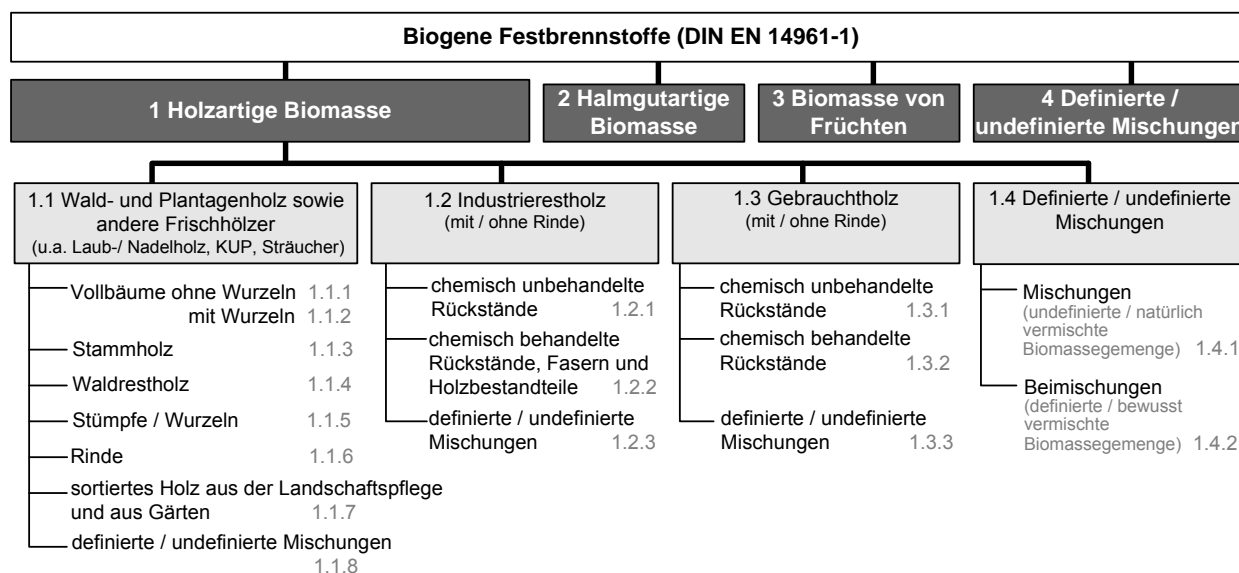


Abb. 2-3: Spezifizierung holzartiger Rohstofffraktionen entsprechend DIN EN 14961-1 /39/

Für die Produktion von Holzpellets werden nahezu ausschließlich chemisch unbehandelte Hölzer eingesetzt (Kapitel 2.1.1). Dabei handelt es sich überwiegend um Resthölzer der Holzbe- und -verarbeitung, welche nach Abb. 2-3 dem Rohstoffsoriment 1.2.1 zuzuordnen sind. Da das am

⁴ darunter: DONG Energy, DRAX, RWE / Essent, Electrabel (GDF Suez), Laborelectric (GDF Suez), Vattenfall, Eon UK, Fortum, DELTA

Markt verfügbare Potenzial an Resthölzern jedoch begrenzt ist, besteht ein zunehmendes Interesse an alternativen Holzfraktionen. Perspektivisch wird deshalb mit einer Zunahme des Frischholzeinsatzes bei der Pelletproduktion gerechnet /14/, /257/. Gemäß der Untergliederung der DIN EN 14961-1 können entsprechende Holzfraktionen beispielsweise (anteilig) aus den Rohstoffsortimenten 1.1.1, 1.1.3, 1.1.4 und 1.1.6 kommen.

Aufgrund der unterschiedlichen Aufwuchsbedingungen und Anfallarten von Holz (als Haupt- oder Nebenprodukt bzw. Abfall) weisen dessen Rohstoffeigenschaften niemals eine vergleichbare Homogenität wie fossile Brennstoffe auf. Dennoch ist es das Ziel der Pelletproduktion einen Brennstoff mit möglichst homogenen chemisch-stofflichen und physikalisch-mechanischen Eigenschaften herzustellen, um optimale Voraussetzungen für den Betrieb einer Feuerungsanlage und den kontrollierten Brennstoffausbrand bereitzustellen.

Im Kapitel 2.2.1 wird deshalb zunächst auf die chemische Zusammensetzung von Holz eingegangen und im Kapitel 2.2.2 die damit verbundenen Brennstoffeigenschaften beschrieben.

2.2.1 Chemische Zusammensetzung

Bezogen auf die Trockenmasse setzt sich Biomasse zu rund 90 % aus Kohlenstoff (C) und Sauerstoff (O) sowie zu rund 6 % aus Wasserstoff (H) zusammen, die von der Pflanze in Form von CO₂, O₂, H₂O oder HCO₃ aufgenommen werden. Diese drei Hauptbestandteile der Pflanzensubstanz sind in allen organischen Verbindungen enthalten (z. B. Lignin, Cellulose, Pektin, Zuckern, Fetten, Stärken, Eiweißen).

Bis zu 5 % der Trockenmasse dienen der Speicherung von Makronährstoffen (N, K, Ca sowie geringere Mengen an P, Mg, S und Fe⁵). Dagegen treten Mikronährstoffe nur in einer Konzentration zwischen 0,001 bis 0,03 % auf (unter anderem Zn, Cu, B, Mn, Mo, Fe). Diese Nährstoffe liegen bis auf wenige Ausnahmen ungebunden in der Phytomasse vor. Das heißt, sie sind nicht in organische Substanz eingebunden. Bisher nicht abschließend geklärt ist die Notwendigkeit und / oder Zuordnung von Cl und Na in Pflanzen /103/.

Tabelle 2-1: Molekulare Zusammensetzung von Biomasse (allgemein) im Vergleich zu holzartigen Rohstoffen /103/, /135/, /116/, /175/, /186/

Komponenten		Typische Anteile und Bestandteile (bezogen auf Trockenmasse)	
Grundsubstanz:	Holocellulose	Cellulose (langkettiges Makromolekül)	
		20 – 55 %	Holz: 40 – 55 %
		Hemicellulose (kurzkettiges, verzweigtes Makromolekül)	
		10 – 40 %	Holz: 20 – 35 %
	Lignin	3-dimensionales Makromolekül	
		10 – 35 %	Nadelholz: 25 – 35 % Laubholz: 18 – 32 %
Begleitstoffe:	Extrakte	3 – 7 %	Holz: 1 – 10 % (in tropischen Hölzern bis 20 %)
		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fette, Öle, Harze, Wachse ▪ Eiweiße, Stärke, Zucker, Kautschuk ▪ Gerb-, Farb-, Bitter- und Riechstoffe, Kampfer ▪ organische und anorganische Säuren, Salze ▪ Mineralstoffe (< 1 %) 	

Bezüglich des molekularen Aufbaus besteht feste Biomassen zu etwa 95 % aus den drei Biopolymeren Cellulose, Hemicellulose und Lignin. Der verbleibende Anteil setzt sich zusammen aus einer Vielzahl von Begleitstoffen, den so genannten Extrakten (unter anderem Harze, Fette, Gerbstoffe, Stärke, Zucker, Eiweiße und Mineralstoffe).

⁵ Eisen (Fe) kann sowohl den Makro- als auch Mikronährstoffen zugeordnet werden.

Nach Tabelle 2-1 variiert die Zusammensetzung verschiedener Rohstoffe art- und standortspezifisch. Selbst bei Betrachtung verschiedener Teile einer Pflanze (z. B. Stammholz, Rinde, Nadeln / Blätter, Wurzeln) sind große Schwankungsbreiten zu beobachten. Weiterhin kann es innerhalb einer Vegetationsperiode bzw. in den verschiedenen Entwicklungsabschnitten einer Pflanze zu Schwankungen der Elementarzusammensetzung kommen. Bei Biomassen mit kurzen Wachstumsphasen (KUP) sind diese häufig deutlicher erkennbar. Standortspezifische Faktoren wie Klima, Wetter und Boden oder pflanzenbauliche Maßnahmen (z. B. Düngung) beeinflussen die Pflanzensubstanz zusätzlich.

Nachfolgend wird der Aufbau und die Zusammensetzung (Tabelle 2-2) sowie die Funktion und aktuelle Verwendungsoptionen bedeutender Holzbestandteile näher erläutert, um daraus Rückschlüsse für die Pelletierbarkeit des Materials und die Verfügbarkeit der Substanzen zu ziehen.

Tabelle 2-2: Molekulare Zusammensetzung und Aschegehalt von Hölzern als Anteil der Gesamtsubstanz, Anhaltswerte bezogen auf Trockenmasse /103/, /175/

Holzarten	Cellulose [%]	Hemicellulose [%]	Lignin [%]	Extraktstoffe ^{a)} [%]	Asche [%]
Tanne	42	23 - 25	≈ 29	≈ 2,3	≈ 1,2
Kiefer	42 - 44	22 - 26	28 - 30	3,2 - 4	≈ 1,3
Fichte	41 - 43	24 - 27	29 - 30	≈ 2	k.A.
Douglasie	≈ 47	≈ 22	≈ 30	≈ 5	k.A.
Esche	≈ 40	≈ 25	≈ 26	2,2	≈ 1,3
Buche	≈ 45	22 - 35	18 - 23	0,7 - 4	≈ 1,6
Birke	41 - 46	27 - 36	19 - 27	2 - 2,2	≈ 1,8
Weide	≈ 43	≈ 22	≈ 25	≈ 2	≈ 1,2
Pappel	48 - 50	18 - 31	18 - 22	2,4 - 4	≈ 1,3
Eukalyptus	≈ 47	≈ 27	≈ 26	≈ 1,5	k.A.

k.A. ... keine Angaben zu fehlenden Anteilen

^{a)} nur auf organische Substanz bezogen; anorganische Substanz (Asche) separat ausgewiesen

- Cellulose.** Die überwiegend aus linearen Glukosepolymeren geformte Cellulose ist die in der Natur am häufigsten vorkommende Substanz. Sie setzt sich zu etwa 48 % aus Kohlenstoff, 52 % Sauerstoff und 6 % Wasserstoff zusammen und bildet die Gerüstsubstanz der Pflanzen sowie die Grundsubstanz der unverholzten Zellwand. Infolge des hohen Kristallinisationsgrades ist Cellulose trotz einer relativ hohen Anzahl hydrophiler Gruppen nicht wasserlöslich, wirkt aber hygroskopisch (wasseraufnehmend, quellfähig). Cellulose gibt der Biomasse eine hohe Formstabilität, insbesondere durch die Verleihung von Zug- und Biegefestigkeit. Beim Holz ist die Zugfestigkeit (Cellulosegehalt) im Mittel doppelt so hoch wie die Druckfestigkeit (Ligningehalt), woraus die relativ hohe Biegefestigkeit des Holzes resultiert. Beispielsweise bilden Laubhölzer als Reaktion auf eine einseitige Windbeanspruchung auf der Zug beanspruchten Seite des Baumes so genanntes Zugholz aus, welches aufgrund des höheren Celluloseanteils eine höhere Festigkeit aufweist als der Rest des Baumes.

Cellulose wird zur Papier- und Dämmstoffherstellung aus Zellstoff und Holzschliff verwendet sowie in der Textil-, Kosmetik- und Lebensmittelindustrie eingesetzt /103/, /135/, /116/.

- Hemicellulose.** Als Hemicellulosen (Polyosen) werden komplex verzweigte Polysaccharide bezeichnet, die multifunktional die Pflanze unterstützen; dies gilt beispielsweise für die Stützwirkung in der Zellmembran oder als Reserve-, Quell- und Klebstoffstoff zur Verkitung der Zellwände. Hemicellulose tritt immer als Cellulosebegleiter auf. Während in Nadelhölzern Hexosane die Grundbausteine der Hemicellulose darstellen, sind es in Laubhölzern Pentosane, die diesem wiederum plastische Eigenschaften verleihen (Holz wird biegsamer). Aufgrund der Heterogenität ihrer Zusammensetzung ist die Ausweisung einer durchschnittlichen Elementarzusammensetzung nicht sinnvoll. Durch die amorphe Molekül-

struktur der Hemicellulosen kann leicht Wasser aufgenommen werden, welches jedoch nur verlangsamt wieder abgegeben wird und so das Austrocknen und Absterben des Zellgewebes verzögert.

Hemicellulosen werden aus landwirtschaftlichen Produkten (z. B. Maiskolben, Haferspелzen) gewonnen und unter anderem als Bindemittel für Aktivkohle oder Briketts, in der Papierherstellung und in der Lebensmittelindustrie (Verdickungsmittel, Gelierung) eingesetzt /103/, /135/, /186/.

- **Lignin.** Lignin ist eine komplexe Polymerkette aus Phenylpropangruppen (aromatische Verbindungen) mit thermoplastischen Eigenschaften. Es setzt sich zu etwa 64 % aus Kohlenstoff, 30 % Sauerstoff und 6 % Wasserstoff zusammen. Lignin tritt nie separat auf, sondern immer als Cellulosebegleitsubstanz. Die rötlich braune Substanz ist der eigentliche Füll- und Verholzungsstoff der Pflanze, der durch seine quellende (geringer als bei Cellulose), verklebende und versteifende Wirkung für die Druckstabilität der Pflanze verantwortlich ist. So sorgt ein hoher Ligningehalt dafür, dass der Spross einer Pflanze auch bei einem nachlassenden Wasserdruck (Tugor) aufrecht stehen bleibt und abtrocknen kann (z. B. bei den Halmen reifer Getreidepflanzen auf dem Feld). Holzartige Biomassen weisen wesentlich höhere Ligninanteile als einjährige Pflanzen (jährlicher Erntezyklus) auf und können deshalb – trotz relativ geringer Wassergehalte – auch hohen Dauerbeanspruchungen bestehen. Der Ligningehalt variiert je nach Holzart und auch innerhalb der Pflanze. So sind die höchsten Ligninwerte typisch für die niedrigsten, höchsten und innersten Teile eines Stammes, für Nadelholzäste, Rinde und Druckholz⁶. Mit der Ernte der Pflanze bzw. dem Fällen des Baumes beginnt der Zersetzungsprozess des Lignins, der durch äußere Faktoren beschleunigt werden kann (UV-Licht, Wärme und Feuchtigkeit).

Lignin fällt in großen Mengen als Nebenprodukt der Zellstoffindustrie an und wird inzwischen sowohl stofflich als auch energetisch genutzt. /103/, /135/, /186/, /202/.

- **Extrakte.** Als Extrakte werden Zwischen- oder Endprodukte des pflanzlichen Stoffwechsels bezeichnet, deren Vorkommen von Holzart, Baumteil, Alter und Standort abhängig ist. Zu den Extrakten bzw. Begleitstoffen gehören über 500 verschiedene Verbindungen. Teilweise werden bei der chemischen Zuordnung der Elementargehalte die anorganischen Bestandteile der Pflanzen (K, Ca, Mg, Fe, Mn etc.) separat als „Asche“ aufgeführt, während die Extraktstoffe nur rein organische Bestandteile beinhalten /186/, /202/.

Extraktstoffe können trotz minimaler Anteile an der Molekularsubstanz von Pflanzen die chemischen und physikalischen Eigenschaften der Biomasse wesentlich bestimmen, wie beispielsweise

- die Widerstandsfähigkeit gegen Pilze und Insekten (Gerbstoffe, Terpene, Phenole),
- den Geruch (z. B. Tanne, Kiefer) und Farbe (z. B. Walnuss, Douglasie),
- die Feuchteresistenz (Harze, Wachse, Fette, Öle),
- die Imprägnierbarkeit (schlechter bei harzhaltigen Hölzern) und
- die Brennbarkeit (bei harzreichen Hölzern besser) /116/.

Man unterscheidet zwei Gruppen von Extraktstoffen. Dies gilt zum einen für die primären Nebenbestandteile (z. B. Stärke, Zucker, Fette, fettige Öle und Eiweiß), die vor allem im Herbst als Speicher- und Reservestoffe angelegt werden, um im Frühjahr beim Austrieb der Pflanze zur Verfügung zu stehen. Deshalb haben Laubbäume meist einen etwas höheren Anteil an Extraktstoffen als Nadelbäume (Ausnahme: Lärche). Zum anderen gibt es die Vielzahl sekundärer Nebenbestandteile, zu denen beispielsweise Kernholzstoffe, Mineralien, Farb- und Gerbstoffe, Harze, ätherische Öle, Reiz- und Giftstoffe zählen. Bis auf wenige

⁶ Als Druckholz wird das bei Nadelbäumen auf der Druck belasteten Seite (z. B. durch Hauptwindrichtung) gebildete Reaktionsholz bezeichnet. Druckholz ist schwerer, härter und dichter als das Normalholz.

Ausnahmen weist das Kernholz mehr Extraktstoffe als das Splintholz eines Baumes auf /135/, /186/, /202/.

Nachfolgend wird eine exemplarische Auswahl relevanter Extraktstoffe diskutiert:

- *Harze, Terpentine und Terpene.* Harze dienen zum Wundverschluss von Pflanzengewebe, härten an der Luft aus und sind hydrophob. Hohe Harzgehalte weisen z. B. Koniferen auf. Terpentine sind flüssige Extraktstoffe, die zusammen mit Harzen auftreten und giftig sind /186/. Beide Substanzen werden als Lösungsmittel, Harzleime, Geruchstoffe oder als Terpentinöl wirtschaftlich genutzt. Terpene sind chemisch ähnlich aufgebaut wie Harze und schützen die Pflanze vor dem Eindringen von Bakterien und Pilzen. Sie sind ebenfalls hydrophob und weisen leicht flüchtige Verbindungen auf /116/.
- *Gerbstoffe und Wachse.* Beide Substanzen sind vor allem in der Rinde von Bäumen enthalten zum thermischen, mechanischen und chemisch-biologischen Schutz des pflanzlichen Gewebes. Sie erhöhen die Widerstandskraft der Pflanze gegen äußere Eindringlinge, wie z. B. Pilze und Insekten /116/.
- *Fette und Stärken.* Fette sind vor allem in Nadelbäumen im Winter in erhöhter Konzentration nachweisbar. Dagegen werden Stärken typischer Weise in der Wachstumsphase von Laubbäumen eingelagert und z. T. während des Winters in Fette umgewandelt /135/.
- *Mineralien.* Mineralien (d. h. Makro- und Mikronährstoffe, wie beispielsweise P, Mg, S, K, Ca, Si), übernehmen unterschiedliche Stoffwechselfunktionen. Der Gehalt an Kieselsäure (Si) hat beispielsweise einen Einfluss auf die Widerstandsfähigkeit gegenüber Insekten – insbesondere bei tropischen Baumarten /135/.

2.2.2 Brennstoffcharakterisierung

2.2.2.1 Abbrandverhalten

Die thermo-chemische Konversion biogener Festbrennstoffe wird in die Teilprozesse „Aufheizen und Trocknen“ ab ca. 100°C, „pyrolytische Zersetzung“ ab ca. 200°C, „Vergasung“ ab ca. 500°C und „Oxidation“ ab ca. 700°C unterteilt (Anhang, Kapitel A.6).

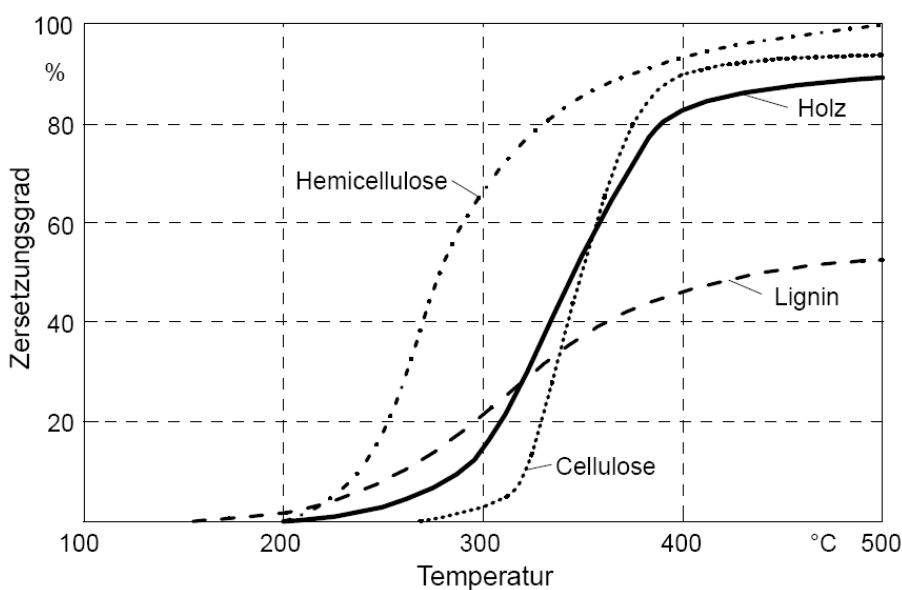


Abb. 2-4: Thermische Zersetzung von Holz und seinen molekularen Bestandteilen Cellulose, Hemicellulose und Lignin in Abhängigkeit von der Temperatur /103/

Die irreversible Zerstörung der Makromoleküle der Biomasse beginnt mit der Erwärmung des Brennstoffs in einem Temperaturbereich zwischen 150 und 200°C (Abb. 2-4). Mit zunehmender Temperatur wird dabei pflanzliche Substanz abgebaut und dabei in die Gasphase überführt

(Flüchtige), bis nur noch fester Kohlenstoff (Holzkohle) verbleibt. Die Massenanteile der dabei freigesetzten gasförmigen Zersetzungsprodukte (CO_2 , H_2O , CH_4 etc.) werden von den Rohstoff-spezifischen Anteilen an Cellulose, Hemicellulose und Lignin bestimmt.

Bei holzartigen Brennstoffen sind nach dem Durchschreiten eines Temperaturbereiches von etwa 320 bis 340°C bereits rund 30 % Gewichtsverluste zu verzeichnen. Bei 400°C wird die maximale Freisetzung von Gasen, Dämpfen und auch des Celluloseabbaus erreicht, die bei etwa 450°C beendet ist. Die Biomasse kennzeichnet nun ein Gewichtsverlust von etwa 70 %. Mit der weiteren Erwärmung des Materials bis zu einer Temperatur von etwa 700°C setzt sich der Ligninabbau fort. Anschließend beginnt die Oxidation der Holzkohle /45/, /88/.

Der genaue Ablauf des thermo-chemischen Umwandlungsprozesses wird von den jeweiligen Brennstoffeigenschaften des Materials beeinflusst und unterliegt auch innerhalb der Holzbrennstoffsortimente einer gewissen Schwankungsbreite /103/.

2.2.2.2 Brennstofftechnische Eigenschaften

Tabelle 2-3 fasst ausgewählte brennstofftechnische Eigenschaften von Holzbrennstoffen und deren Auswirkungen auf den Verbrennungsprozess sowie der vor- und nachgelagerten technischen Systeme – wie die Brennstoffbereitstellung (Transport, Lagerung) und Ascheverwertung – zusammen. Aus den brennstoffcharakterisierenden Kenngrößen lassen sich Aussagen zur Kompatibilität von Brennstoff und Feuerungsanlage sowie zum Verlauf der thermochemischen Konversion ableiten. Dabei ist die Angabe der physikalisch-mechanischen Eigenschaften unter anderem für die Auswahl bzw. Eignung der Verbrennungstechnik aufgrund der Brennstoffgeometrie und -festigkeit sowie für die Brennstofflagerung und den Transport relevant. Im Unterschied dazu beeinflusst die Elementarzusammensetzung (chemisch-stoffliche Brennstoffeigenschaften) beispielsweise den Energie- und Aschegehalt sowie das Abbrandverhalten eines Brennstoffs einschließlich möglicher Emissionen und der Aschezusammensetzung /45/, /103/, /256/.

Tabelle 2-3: Charakteristische Brennstoffparameter und -eigenschaften von Holz /15/, /25/, /60/, /75/, /85/, /99/, /103/, /109/, /132/, /134/, /152/, /151/, /246/, /256/

Parameter	Auswirkungen / Effekte auf den Verbrennungsprozess
<i>Chemisch-stoffliche Brennstoffeigenschaften</i>	
Heizwert, Brennwert	<ul style="list-style-type: none"> • Energiegehalt des Brennstoffs • Dimensionierung der Feuerungsanlage und des Lagers
Aschegehalt	<ul style="list-style-type: none"> • Partikelemissionen (Staub), Dimensionierung der Feuerungsanlage • Ascheanfall / Verschlackungsgefahr, Ascheverwertung und –entsorgung • Reinigungsbedarf, Bedienkomfort
Ascheschmelzverhalten	<ul style="list-style-type: none"> • Neigung zu Ablagerungen und Verschlackung • Feuerraumdesign (z. B. Rostauslegung und -kühlung) • Betriebssicherheit und –kontinuität, Wartungsbedarf
Flüchtige Bestandteile	<ul style="list-style-type: none"> • therm. Zersetzung, Verbrennungsverhalten / Zündfreudigkeit des Brennstoffs
Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H), Sauerstoff (O)	<ul style="list-style-type: none"> • Energiegehalt des Brennstoffs • Luftbedarf während der Verbrennung • Zusammensetzung der Konversionsprodukte (Produkt-/Abgas) und der Asche
Stickstoff (N)	<ul style="list-style-type: none"> • Abgasemissionen (NO_x, N_2O, HCN, N_3H)
Schwefel (S)	<ul style="list-style-type: none"> • Abgasemissionen (SO_x, H_2SO_3, H_2SO_4), Korrosionsgefahr • Aerosolbildung (Feinstaub)
Chlor (Cl)	<ul style="list-style-type: none"> • Abgasemissionen (HCl, Cl_2, Dioxine und Furane PCDD/F), Korrosionsgefahr • Aerosolbildung (Feinstaub) • Verschlackung im Zusammenwirken mit Alkali-/Erdalkalimetallen
Phosphor (P)	<ul style="list-style-type: none"> • Schadstoffeinbindung in der Asche; Ascheverwertung (Düngewert)
Alkali- / Erdalkalimetalle (K, Ca, Mg, Na)	<ul style="list-style-type: none"> • Feinstaubemissionen / Aerosolbildung (K, Na) • Hochtemperaturkorrosion (K, Na)

	<ul style="list-style-type: none"> • Ascheschmelzverhalten (K und Na senken, Ca und Mg heben Ascheschmelztemperatur) • Schadstoffeinbindung in die Asche (Ca, Mg); Ascheverwertung (Düngewert: Ca, K, Mg)
Spurenelemente, v.a. Metalle (Fe, Zn, Al, Cd, Cu, Cr, Ni, Hg, Pb, Si, As)	<ul style="list-style-type: none"> • Abgasemissionen, Aerosolbildung (Zn, Pb), z. T. katalytische Wirkung auf PCDD/F-Bildung; Abrieb an Förderanlagen • Ascheschmelzverhalten (Si senkt Ascheschmelztemperatur) • Aschemenge, -qualität und -verwertung
Physikalisch-mechanische Brennstoffeigenschaften	
Wassergehalt	<ul style="list-style-type: none"> • Trocknungsbedarf des Brennstoffs; Lagerfähigkeit (Pilzwachstum, Lagerverluste) des Brennstoffs, Risiko der Selbstentzündung • Brennstoffmasse, Heizwert, Verbrennungstemperatur, Ausbrennzeit
Stückigkeit / Korngröße (Abmessungen, Form)	<ul style="list-style-type: none"> • Zuordnung zu mechanischen Systemen (Förderung) und Feuerungstypen • Zündfähigkeit, Ausbrennzeit
Partikel- und Faserstruktur	<ul style="list-style-type: none"> • Stückigkeit, Mahlbarkeit (Auswahl und Dimensionierung der Zerkleinerungstechnik zur Brennstoffaufbereitung für die Pelletierung bzw. zur Brennstoffeinbringung in den Feuerraum)
Größenverteilung	<ul style="list-style-type: none"> • Homogenität des Brennstoffs, Trocknungseigenschaften, Abbrandverhalten • Transport- und Förderverhalten (Rieselfähigkeit, Brückenbildungsneigung, Störanfälligkeit der Fördererlemente / Betriebskontinuität)
Feinanteil	<ul style="list-style-type: none"> • Schüttdichte, Transportverluste, Staubentwicklung / Explosionsgefahr
Abriebfestigkeit	<ul style="list-style-type: none"> • Qualitätsverluste, Entmischungsgefahr, Feinanteil
Schütt- / Lagerdichte	<ul style="list-style-type: none"> • Auswahl und Dimensionierung der Lager-, Förder- und Transporteinrichtungen
Roh- / Teilchendichte	<ul style="list-style-type: none"> • Lagerdichte, Auswahl und Dimensionierung der Fördersysteme • Pelletierbarkeit des Materials (Energieaufwand) • Energieträgerspezifische Eigenschaften / Umsetzungskinetik (spezifische Wärmeleitfähigkeit, Ausbrennzeit / Entgasungsrate etc.)

Im Vergleich zu Pflanzen mit einjährigem Wachstumszyklus ist die Schwankungsbreite der Elementargehalte von chemisch unbelasteten Hölzern gering /39/. Dennoch fallen in Tabelle 2-4 einige z. T. deutlich erhöhte Elementgehalte in rindenbehafteten Holzfraktionen auf (z. B. K, Ca, Si), die häufig auf die dort eingelagerten Mineralien zurückgeführt werden können (Kapitel 2.2.1). Für Nadelhölzer wird ein – im Vergleich zu Laubholz – durchschnittlich etwa 2 % höherer Heizwert festgestellt. Diese Steigerung sowie auch der um weitere 2 % höhere Heizwert der Nadelholzrinde ist auf den höheren Ligningehalt der Nadelhölzer bzw. teilweise auf den erhöhten Gehalt an Extraktstoffen (u. a. Harze, Terpentine, Wachse, Fette) zurückzuführen. Beide Stoffgruppen kennzeichnen sich dadurch, dass ihr Heizwert mit etwa 27,0 bzw. 35,9 MJ/kg deutlich höher ist als der für Cellulose (ca. 17,3 MJ/kg) oder Hemicellulose (ca. 16,2 MJ/kg) /103/.

Tabelle 2-4: Typische Schwankungsbreite der Brennstoffzusammensetzung naturbelassener Hölzer (erntefrisches Material, alle Werte auf Trockenmasse bezogen) /39/

Parameter	Einheit	Stammholz und Nebenprodukte ^{a)}		Rinde		Waldrestholz		KUP Weide, Pappel
		Nadelbaum	Laubbaum	Nadelbaum	Laubbaum	Nadelbaum	Laubbaum	
C	Ma-%	47 - 54	48 - 52	48 - 55	47 - 55	48 - 52	50 - 51	46 - 50
H	Ma-%	5,6 - 7,0	5,9 - 6,5	5,5 - 6,4	5,3 - 6,4	5,7 - 6,2	5,8 - 6,1	5,7 - 6,5
O	Ma-%	40 - 44	41 - 45	34 - 42	32 - 42	38 - 44	40 - 43	39 - 45
N	Ma-%	< 0,1 - 0,5	< 0,1 - 0,5	0,3 - 0,9	0,1 - 0,8	0,3 - 0,8	0,3 - 0,8	0,2 - 0,8
S	Ma-%	< 0,01 - 0,02	< 0,01 - 0,05	< 0,02 - 0,05	< 0,02 - 0,20	< 0,02 - 0,06	0,01 - 0,08	0,02 - 0,10
Cl	Ma-%	< 0,01 - 0,03	< 0,01 - 0,03	< 0,01 - 0,05	< 0,01 - 0,05	< 0,01 - 0,04	< 0,01 - 0,02	< 0,01 - 0,05
P	Ma-%	0,005 - 0,01	0,005 - 0,02	0,002 - 0,06	0,03 - 0,07	0,05	0,003 - 0,1	0,05 - 0,13
K	Ma-%	0,02 - 0,05	0,05 - 0,15	0,1 - 0,3	0,1 - 0,32	0,1 - 0,4	0,1 - 0,4	0,17 - 0,4

Ca	Ma-%	0,05 - 0,1	0,08 – 2,0	0,1 - 1,5	1,0 – 2,0	0,2 - 0,8	0,3 - 0,5	0,2 - 0,9
Mg	Ma-%	0,01 - 0,02	0,01 - 0,04	0,04 - 0,15	0,04 - 0,1	0,04 - 0,2	0,01 - 0,04	0,02 - 0,08
Na	Ma-%	0,001 - 0,005	0,001 - 0,02	0,007 - 0,2	0,002 - 0,1	0,0075 - 0,03	0,002 - 0,02	0,001 - 0,045
Al	Ma-%	0,003 - 0,04	<0,001-0,005	0,04 - 0,12	0,003 - 0,01	k.A. ^{b)}	0,0001 - 0,3	0,0003 - 0,01
Fe	Ma-%	0,001 - 0,01	0,001 - 0,01	0,1 - 0,3	0,1 - 0,32	0,05 - 0,1	0,001 - 0,15	0,003 - 0,06
Si	Ma-%	0,01 - 0,02	0,01 - 0,02	0,05 - 0,5	0,2 - 2,0	0,02 - 0,1	0,0075-0,025	0,0002 - 0,2
Zn	Ma-%	0,0005-0,005	0,0005 - 0,01	0,007 - 0,02	0,007 - 0,02	0,0008-0,003	0,0002 - 0,01	0,003 - 0,01
Hi	MJ/kg	18,5 - 19,8	18,4 - 19,2	17,5 - 20,5	17,1 - 21,3	18,5 - 20,5	18,3 - 18,5	17,7 - 19,0
Hs	MJ/kg	20,0 - 20,8	19,4 - 20,4	18,0 - 21,4	18,0 - 22,7	19,5 - 210,5	19,5 - 20,0	19,2 - 20,4
Asche gehalt	Ma-%	0,1 - 1,0	0,2 - 1,0	< 1 - 5	0,8 - 3,0	< 1 - 10	2 - 10	1,1 - 4,0

KUP ...Kurzumtriebsplantagenhölzer, k.A....keine Angaben vorhanden

^{a)} mit unbedeutsamen oder ohne Anteilen an Rinde, Blättern und Nadeln; chemisch unbelastete Reststoffe der Holzprozessindustrie (z. B. Sägenebenprodukte)

2.2.2.3 Verbrennungsprodukte

Die Rückstände aus der vollständigen Verbrennung biogener Festbrennstoffe können in luftgetragene Emissionen und unverbrennbare Bestandteile (Asche) unterteilt werden. Deren Menge und Konzentration wird sowohl vom Brennstoff, der Feuerungsanlage und der Betriebsart bestimmt. Letztere kann je nach Lastanforderungsprofil (Voll-/Teillastbetrieb) und dem Verbraucherverhalten (insbesondere bei der handbeschickten Befüllung der Brennkammer) die Effizienz einer Feuerungsanlage und damit auch die Qualität und Quantität der Verbrennungsprodukte beeinflussen /45/.

Neben den Hauptprodukten der vollständigen Verbrennung – CO₂ und H₂O – werden eine Reihe weiterer Emissionen freigesetzt, deren Ursache bereits Tabelle 2-3 und die Auswirkungen auf den Verbrennungsprozess Tabelle 2-5 zusammenfasst. Sie formieren sich u. a. aus Haupt- (Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, P, Si, Ti) und Nebenelementen (As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Tl, V, Zn) – meist in Kombination mit Chlor und Schwefel /15/.

Das größte Problem in modernen Biomassefeuerungsanlagen stellen die Staubemissionen dar. Sie haben eine Größe zwischen 0,001 bis 100 µm. Partikel der vollständigen Verbrennung bestehen aus Ascheteilchen (z. B. CaO, Al₂O₃, SiO₂, KCl) sowie Fremdstoffen (z. B. Erde, Sand, Schwermetalle). Partikel der unvollständigen Verbrennung setzen sich aus den C-haltigen Zersetzungsprodukten zusammen, meist resultierend aus einem unvollständigen Ausbrand, aus C-Syntheseprodukten (z. B. Ruß) oder aus Brennstoffteilchen, die direkt aus dem Glutbett mitgerissen werden und sich unverbrannt im Abgas wieder finden /60/, /147/.

Holzfeuerungsanlagen emittieren u. a. Partikel mit einer Größe ≤ 10 µm (d. h. Feinstaub⁷). Je nach Aschegehalt des Brennstoffs, besonders aber in Abhängigkeit der Brennstoffform (Pellets, HHS oder Stückholz), liegt die Größe der Staubpartikel bei Pelletfeuerungen überwiegend unterhalb von 1 µm. Derartige Aerosole werden von aerosolbildenden Brennstoffkomponenten (relevante Elemente: K, Na, S, Cl, Zn, Pb) und der Partikelbildung via Nukleation aschebildender Dämpfe sowie durch Partikelwachstum via Kondensation und Agglomeration formiert /152/. Aufgrund ihrer geringen Größe sind Aerosole gut lungengängig und können z. T. auch direkt ins Blut übertreten und somit die Gesundheit von Lebewesen gefährden. Neben der Größe und Zusammensetzung der Partikel beeinflussen auch die Oberflächenbeschaffenheit und Form der Feinstaubpartikel das Gesundheitsgefährdungspotenzial /130/.

⁷ Der Begriff „Feinstaub“ bzw. „Feinstpartikel“ beschreibt eine komplexe Mischung aus festen und/oder flüssigen in die Luft ausgestoßenen organischen und anorganischen Schadstoffen. Sie variieren nach Größe, Zusammensetzung und Herkunft und werden anhand ihrer Partikelgröße bzw. des aerodynamischen Durchmessers beschrieben, z. B. PM₁₀ sind Feinstaubpartikel mit einer Größe ≤ 10 µm /238/.

Asche fällt bei der Verbrennung von Holz je nach Feuerungsanlage, der Art der Biomasse und der Betriebsweise der Anlage (Lastverhalten) in unterschiedlichen Mengen an. Sie kann entsprechend ihres Anfallorts und der Partikeldimension in drei Fraktionen unterteilt werden: Grob- bzw. Rostasche, Zyklonasche und Feinstflugasche /150/. Bei den Brennstoffaschen handelt es sich größtenteils um anorganische Verbrennungsrückstände. Sie bestehen vor allem aus Oxiden und Karbonaten diverser Metalle (z. B. Al_2O_3 , CaO , Fe_2O_3 , MgO , P_2O_5 , K_2O , SiO_2 , Na_2CO_3 , NaHCO_3) /75/, /77/. In der Regel liegt bei biogenen Festbrennstoffen mit einem spezifisch geringen Aschegehalt und bei Aschen mit einer geringeren Korngrößenbeschaffenheit (Flugaschen) eine höhere Schwermetallbelastung (Pb, Cd, Zn, As, Hg) vor, da die nicht-brennbaren Schwermetalle in der Asche aufkonzentriert werden /150/. Die Anteile und Konzentration der Spurenelemente und (Erd-)Alkalimetalle im Brennstoff beeinflussen dessen Ascheschmelzverhalten.

Tabelle 2-5: Ausgewählte Emissionsprodukte aus der Verbrennung von Holzbrennstoffen und deren Ursache /38/, /60/, /75/, /103/, /225/

Emissionen	Verbindungen	Ursache
Wasserdampf	H_2O	▪ Stoffe der vollständigen Verbrennung der Hauptbrennstoffbestandteile (C, H, O)
Kohlenstoffdioxid ^{a)}	CO_2	
Kohlenstoffmonoxid	CO	▪ unvollständige Verbrennung
Kohlenwasserstoffe	C_nH_m in der Gasphase	▪ unvollständige Verbrennung
Chlorverbindungen ^{b)}	HCl Dioxine, Furane (PCDD/F)	▪ abhängig vom Brennstoffgehalt (hohes Risiko bei chemisch behandelten Biobrennstoffen und Halmgütern, eher geringe Brennstoffabhängigkeit bei Naturholz); temperaturabhängig
Schwefelverbindungen ^{c)}	SO_3 SO_2 H_2SO_3 H_2SO_4	▪ abhängig vom Brennstoffgehalt (kaum relevant bei Naturholz) ▪ bei der Verbrennung des Abgases wird SO_2 aufoxidiert zu SO_3 ▪ SO_2 und SO_3 reagieren bei Taupunktunterschreitungen mit Wasserdampf zu korrosiver schwefliger Säure (H_2SO_3) bzw. Schwefelsäure (H_2SO_4)
Stickstoffoxide	NO , NO_2 und N_2O HCN	▪ Verbindungen aus dem molekularen Stickstoff der Verbrennungsluft und dem im Brennstoff enthaltenen Stickstoff; entscheidend für die Menge der freigesetzten Stickstoffoxide ist die Temperaturverteilung im Brennraum ^{d)}
unverbrannte Bestandteile	Asche, unverbrannter Brennstoff, Teer, Ruß	▪ Anteil anorganischen Materials im Brennstoff, unvollständige Verbrennung, Ruß (C) tritt auch als Zwischenprodukt auf

^{a)} Im Gegensatz zur Verbrennung von fossilen Energieträgern wird die Biomasseverbrennung allgemein als CO_2 -neutral eingestuft, da bei ihrer thermischen Nutzung nur soviel CO_2 freigesetzt wird, wie sie während ihres Wachstums der Atmosphäre entzogen hat.

^{b)} 40 – 95 % der brennstoffbedingten Cl-Verbindungen werden in die Asche eingebunden

^{c)} in der Regel liegen zum Ende der Verbrennung ca. 99 % SO_2 und 1 % SO_3 vor

^{d)} Hohe Brennraumtemperaturen, die für eine vollständige Verbrennung positiv sind, begünstigen die Bildung von Stickstoffoxiden. Deshalb muss in jeder Feuerungsanlage ein Kompromiss zwischen den Anforderungen eines besonders guten Ausbrandes mit geringen Kohlenstoffmonoxid- und Stickstoffoxid-Emissionen gefunden werden.

Vor dem Hintergrund der in Kapitel 1.1 diskutierten Problemstellung von Versinterungs- und Verschlackungserscheinungen in vereinzelt Pelletfeuerungsanlagen, wird nachfolgend kurz auf deren physikalischen Ablauf eingegangen, soweit diese brennstoffbedingt sind.

Während des Verbrennungsprozesses (Anhang, Kapitel A.6) werden u. a. Alkaliverbindungen (KOH, KCl, NaCl etc.) in die Gasphase entlassen und reagieren mit dem im Holz gebundenen Silizium und/ oder anderen verfügbaren Mineralien. Dabei kann es auf den Brennstoffpartikeloberflächen zur Bildung von partiellen Silikatschmelzen kommen. Diese lokalen Schmelzen sind zähflüssig und besitzen verklebende Eigenschaften, wodurch immer mehr Partikel an den

Oberflächen anhaften und zunehmend anwachsen. Je nach Konstruktion des Feuerungssystems kommt es zur Ablagerung des Partikelverbundes im Brennraum oder auf den Wärmeübertragerflächen. Werden diese Ablagerungen nicht kontinuierlich durch den Brennstoffnachschub oder mechanische Abreinigungsvorgänge entfernt, kann es bei entsprechend hohen Glutbetttemperaturen zur Versinterung kommen und mit zunehmenden Verweilzeiten auch zur Ausbildung von Schlacken im Brennraum /10/, /103/, /153/. Dabei wird vor allem einer überdurchschnittlich hohen Konzentration an Silizium (Si), Kalium (K) und Natrium (Na) im Brennstoff eine senkende Wirkung der Ascheschmelztemperatur nachgesagt. Dagegen bewirken Kalzium (Ca) und Magnesium (Mg) tendenziell eher eine Erhöhung der Ascheschmelztemperatur und können damit zur Vermeidung von Versinterung und Verschlackung beitragen /66/, /103/, /152/, /245/.

Neben dem Aschegehalt und dem Ascheschmelzverhalten kann auch der Düngewert der Aschen (Anhang, Kapitel A.7.2) aus der Verbrennung naturbelassener Biomassen und die zur Verfügung stehenden Verwertungsoptionen Einfluss auf die Rohstoffauswahl haben.

2.3 Grundlagen der Agglomeration

Die Pelletierung ist ein Agglomerationsprozess, bei dem kleine Faserpartikel biogener Rohstoffe mit einem relativ niedrigen Feuchtegehalt unter Druck- und Temperatureinwirkung zu einer vordefinierten kompakten Form gepresst werden, wobei unterschiedliche Bindungsmechanismen wirken. Dabei werden die drei folgenden Prinzipien unterschieden /96/, /103/:

- Herstellung formschlüssiger Bindungen durch Vernetzung von Faserpartikeln,
- Aktivierung der Anziehungskräfte zwischen den Feststoffteilchen in Form von Wasserstoffbrückenbindungen,
- Bildung von Festkörperbrücken durch die verklebende Wirkung von Inhaltsstoffen (Lignin, Eiweiß, Pektin, Harz, Wachs, Stärke) oder speziellen Zuschlagstoffen.

Die Bindefähigkeit des Agglomerates wird somit von der Art der Bindungskräfte, ihrer Stärke und der Reichweite ihrer Haftungskräfte bestimmt. Die Haftungskräfte unterliegen zeitlichen Änderungen, die z. B. durch mechanische Beanspruchung des Agglomerates oder durch Wechselwirkungen mit der Umgebung, wie Adhäsion und Desorption von Flüssigkeiten, verursacht werden können /95/, /211/, /212/.

2.3.1 Bindungsmechanismen und -formen

Eine konstante Endproduktqualität wird wesentlich von der Homogenität und Gleitfähigkeit des Ausgangsmaterials während der Pressung bestimmt /103/, /212/. Dabei stellt die Bindefähigkeit des Rohmaterials eine wichtige Kenngröße dar, die einen wesentlichen Einfluss auf die mechanische Festigkeit der Presslinge hat. Die natürliche Bindefähigkeit jedes Rohstoffs und damit dessen Eignung zur Pelletierung ist unterschiedlich, kann aber prozesstechnisch beeinflusst werden. Die Bindefähigkeit von holzartigen Rohstoffen wird unter anderem von der Holzart und der Lagerdauer des Rohmaterials bestimmt; aber auch die Art und Intensität der vorbereitenden Rohstoffaufbereitungsmaßnahmen können dessen Bindefähigkeit beeinflussen, z. B. durch die thermische Aktivierung des Rohmaterials mittels Heißdampf oder Wasser (Kapitel 3.2.1, 3.2.2).

Grundsätzlich kann zwischen stofflichen und nicht-stofflichen Bindung unterschieden werden. Je nach Erscheinungsform ist die Übertragung unterschiedlicher Spannungspotenziale (Bindungskräfte) möglich. Die für die Holzpelletierung relevanten Formen werden nachfolgend beschrieben und in Abb. 2-5 veranschaulicht /69/, /87/, /95/, /96/, /103/, /117/, /185/, /211/, /221/, /251/:

- **Bindungsmechanismen mit stofflicher Bindung**
 - *Formschlüssige Bindungen.* Faserförmiger Rohstoffe bilden durch Verhaken, Umschlingen, Verfilzen oder Verflechten der Partikel miteinander (z. B. der Holzspäne) formschlüssige Bindungen. Dabei können maximal Spannungen bis zur Festigkeit des Feststoffs übertragen werden.

- *Festkörperbrückenbindung durch Sinter- oder Verschmelzungsbrücken.* Durch Verflüssigung von Feststoffbestandteilen aufgrund der Reibungswärme während des Agglomerationsprozesses in der Presse (wie des holzeigenen Lignins) können Sinter- oder Verschmelzungsbrücken zwischen den Feststoffteilchen gebildet werden (thermo-chemische Reaktion). Festkörperbrücken können ebenfalls Spannungen bis zur Bruchfestigkeit des Feststoffs, aus dem die Brücken bestehen, übertragen.
- **Bindungsmechanismen ohne stoffliche Bindung** (teilweise in Vorbereitung einer stofflichen Bindung)
 - *Wasserstoffbrückenbindung.*
 - Kapillare Bindungen. Beim Einsatz von Wasser (Bindemittel mit niedriger Viskosität) treten Flüssigkeitsbrücken zwischen den Partikeln aufgrund von Kapillarkräften auf. Die Bindungskräfte werden durch die Grenzflächenkraft (Oberflächenspannung) an den fest-flüssig-gasförmigen Berührungsflächen sowie dem kapillaren Unterdruck übertragen.
 - Adhäsions- und Kohäsionskräfte. Als Kohäsionskraft bezeichnet man die Bindungskraft zwischen den Atomen / Molekülen eines Stoffes, während die Adhäsionskraft auf den Bindungskräften zwischen zwei unterschiedlichen Phasen beruht. Bei der Zugabe von Wasserdampf während der Konditionierung der Einsatzstoffe wird das Pressgut (die Späne) erwärmt und die Rohstoffpartikel aufgeweicht, so dass sich leichter kohäsive Brücken zwischen den Partikeln formen können und die Reibung während der Pelletierung reduziert wird. Beim Einsatz von (zäh-)flüssigen Bindemitteln mit hoher Viskosität (z. B. Melasse) bewirken die Kohäsionskräfte dagegen den Zusammenhalt des „Klebmittels“. Daher kommen die Brücken zwischen den Bindemittel und den Holzpartikeln nur aufgrund der Adhäsionskräfte (adsorbierende Wasserschichten < 3 nm) zustande, wobei sich die Kohäsionskräfte im Bindemittel bzw. die Adhäsionskräfte zwischen Partikeln und Bindemittel voll ausnutzen lassen. Nach der Austrocknung/-kühlung der Pellets können die Brückenbindungen zwischen dem zähflüssigen Bindemittel und den Festkörperpartikeln den Festkörperbrücken zugeordnet werden.
 - *Festkörperbrückenbindung durch Kristallisation.* Eine weitere Erscheinungsform stellt die Kristallisation der in Flüssigkeiten gelösten Teilchen zwischen Feststoffpartikeln dar, die z. B. beim Einsatz stärkehaltiger Bindemittel (als Pulver in Wasser gelöst) zur Pelletierung und dem Aushärten /Austrocknung der Pellets im Kühler auftreten.

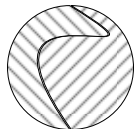
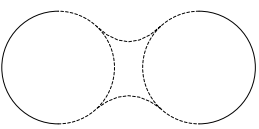
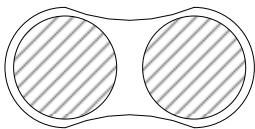
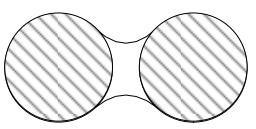
			
Formschlüssige Festkörperbrücken durch Verflechtung der Rohstoffteilchen (Holzpartikel untereinander)	Sinterbrücken durch Aufschmelzen eines Feststoffs und dessen anschließender Abkühlung mit Aushärtung (Wirkung von Lignin als Bindemittel)	Brückenbindung durch Adhäsionskräfte zwischen flüssigen Bindemitteln und festen Partikeln (z. B. Einsatz von Melasse als Bindemittel)	Brückenbindung nach der Kristallisation der in Flüssigkeiten gelösten Partikel (z. B. Einsatz von stärkehaltigen Bindemitteln)

Abb. 2-5: Prinzipdarstellung möglicher Bindungsformen während der Holzpelletierung

Somit werden die beschriebenen Bindemechanismen zwischen den Partikeln nur zum Teil während des eigentlichen Pressvorgangs bei der Pelletierung ausgelöst. Vor- und nachgelagerte Prozesse beeinflussen die Art und Wirkung der Bindungsmechanismen, und sie führen zu gewollten physikalischen und / oder chemischen Modifizierungen des Rohmaterials, die wichtig für die angestrebte Produktqualität sind /251/. In Tabelle 2-6 werden die grundlegenden verfahrenstechnischen Prozesse der Holzpelletproduktion dargestellt und deren Wirkungsprinzip auf die Bin-

dungsmechanismen zwischen den Rohmaterialteilchen erläutert.

Tabelle 2-6: Verfahrenstechnische Grundprozesse der Holzpelletproduktion und deren Wirkungseffekte auf die Bindefähigkeit des Material, in Anlehnung an /251/

Grundprozesse	Wirkungsprinzip /-effekte
Zerkleinern (Grob- und Feinzerkleinerung des Rohholzes, z. B. mittels Hacker und / oder Mühlen)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hydromechanische Aktivierung des Materials ▪ Zerfaserung, Vergrößerung der spezifischen Partikeloberfläche ▪ Aufbrechen von Pflanzenzellen und Freisetzen von Zellinhaltsstoffen ▪ Auslösen von Festkörperreaktionen
Trocknen (technische Trocknung der Einsatzstoffe, z. B. mittels Spantrockner)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Entfernung von Wasser; Konservierung der organischen Substanz ▪ Auslösen von thermo-chemischen Reaktionen (z. B. bei direkt befeuerten Trocknern, Kapitel 3.2.1) ▪ Beschleunigung von Festkörperreaktionen durch Schrumpfung und Auskristallisation (z. B. Harze, temperaturabhängig)
Mischen (während der Zerkleinerung des Holzes, der Spanlager und -förderung, sowie während des Konditionierungsprozesses des Pressguts)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Feststoffhomogenisierung ▪ Dispergierung und Lösen von Feststoffbestandteilen (begünstigt Abscheiderate von Fremd- und Störstoffen) ▪ Vorkontaktierung von aktivierten Feststoffphasen; Kombination von aktiviertem Spanmaterial mit ebenfalls aktivierten Bindemitteln / Zuschlagstoffen ▪ Auslösen von Festkörperreaktionen, Bildung von Hydrathüllen
Agglomeration (Pelletierung / Pressung des Materials, z. B. mittels Kollergangpressen)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verdichtung, Porositätsverminderung ▪ Auslösen von Festkörperreaktionen, Strukturbildung ▪ Auslösen von Bindekräften; Formgebung ▪ Thermo-mechanische / thermo-chemische Festkörperreaktionen
Nachbehandlung / Klimatisierung (Abkühlung der Pellets auf Umgebungstemperatur, z. B. mittels Kühler)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Feuchteausgleich ▪ Beschleunigung von Festkörperreaktionen durch Schrumpfung und Auskristallisation ▪ Fixierung von Reaktionsverbänden, Absättigung von Restbindungspotenzialen, Ausheilen von Strukturfehlstellen ▪ Abbau von mechanischen und thermischen Spannungen

Aus Tabelle 2-6 wird die Vielzahl der Prozessparameter und damit die Notwendigkeit eines individuell auf den Einsatzstoff abgestimmten Pelletierprozesses deutlich, um die natürliche Bindungsfähigkeit des Materials optimal zu nutzen. Die stärksten Bindungskräfte wirken während des Pressvorganges selbst, bei der die Formgebung der zylindrischen Presslinge stattfindet /251/.

Durch den Verdichtungs Vorgang des Pelletierens wird einerseits die Anzahl der Kontaktstellen und die Kontaktflächen zwischen den Partikeln erhöht und andererseits die Partikelhaftung durch Verdichtung der Kontaktbereiche verstärkt. Dabei liegen bei den faserigen Rohmaterialien meist formschlüssige Festkörperbindungen zwischen den Teilchen vor. Das große Porenvolumen holzartiger Rohstoffe begünstigt den Eingang von formschlüssigen Bindungen beim Pelletieren zusätzlich. Weiterhin trägt das holzeigene Bindemittel Lignin sowie der Einsatz von additiven Bindemitteln zur Stabilität der Pellets auch nach dem Abkühlen und Aushärten bei (Kapitel 2.3.2). Die Bindevorgänge laufen sowohl an der Faseroberfläche als auch im Faserinneren des Pressguts ab – häufig parallel oder auch kombiniert.

2.3.2 Einsatz und Wirkung ausgewählter Bindemittel

Der Einsatz von Bindemitteln während der Holzpelletproduktion stellt immer eine Kompensationsmaßnahme unzureichend vorhandener natürlicher Bindemittel des Holzes – wie Lignin oder Harz – dar (Kapitel 2.2.1). Ziel des additiven Bindemiteleinsatzes ist deshalb die Erleichterung des Herstellungsprozesses durch die Verbesserung der Pressguteigenschaften sowie eine Erhöhung der Brennstofffestigkeit der Pellets zu erreichen /42/, /44/, /156/.

In der Praxis wird die Art und Menge des additiven Bindemittleinsatzes zur Holzpelletierung zur Nutzung in KFA durch gesetzliche Brennstoffanforderungen beschränkt (Kapitel 2.1).

2.3.2.1 Normkonforme Bindemittel

Wasser stellt das günstigste Bindemittel dar und ist bereits im Holzrohrstoff vorhanden (Kapitel 2.2.1). Während der Holz Trocknung wird das Spanmaterial niemals auf 0 % Wassergehalt getrocknet, obwohl damit eine höhere Energiedichte erreicht werden könnte. Ein bestimmter Wassergehalt im Pressgut ist jedoch zur Aufrechterhaltung der Flexibilität des Spanmaterials bzw. zum Erweichen der hydrophilen Holzgrundsubstanz (Cellulose) und der wasserlöslichen Holzbestandteilen mit Klebwirkung notwendig (z. B. Stärke, Zucker, Eiweiße) /116/, /135/, /175/. Da Wasser somit bereits Bestandteil des Holzrohmaterials ist, gibt es für die Zumischung von zusätzlichem Wasser oder Dampf während der Einsatzstoffkonditionierung keine Einschränkungen. Der Wassergehalt des Endproduktes (Holzpellets) ist jedoch auf maximal 10 % begrenzt, da die brennstofftechnischen Anforderungen der 1. BImSchV für Kleinfeuerungsanlagen herangezogen werden /18/, /19/, die wiederum auf die DINplus oder vergleichbare Normen verweisen (Tabelle A-3).

Im Gegensatz zur Wasserbeimischung grenzt die 1. BImSchV die Verwendung sonstiger Bindemittel ein. Für die Herstellung von Presslingen aus Holz dürfen nur Bindemittel aus Stärke, pflanzlichem Stearin, Melasse und Cellulosefasern verwendet werden (Kapitel 2.1.1) /19/.

Die DINplus untersetzt die zulässige Presshilfsmittelauswahl und limitiert den maximal zulässigen Presshilfsmittel-Einsatz bei der Holzpelletierung auf 2 Mass-% (Kapitel 2.1.2). Diese Mengenbeschränkung für additive Bindemittel wird auch bei der Umsetzung der EN 14961-2 in nationales Recht beibehalten, aber es gibt keine Einschränkung bezüglich der Bindemittelart /188/. Allerdings müssen die gesetzlichen Anforderungen der 1. BImSchV den gesetzlich nicht verbindlichen Brennstoffnormen übergeordnet werden.

Daraus ableitend sind in Tabelle 2-7 die in Deutschland zulässigen Bindemittel für die Produktion von Holzpellets zum Einsatz in KFA aufgeführt und hinsichtlich ausgewählter Eigenschaften für die Pelletproduktion charakterisiert (Verfügbarkeit am Markt, Haltbarkeit, Rohstoffpreis).

Tabelle 2-7: Zulässige Bindemittel für die Pelletierung von Holz und deren Dosiermöglichkeiten, in Anlehnung an /50/, /72/, /76/, /143/, /141/, /202/

Bindemittel	Eigenschaften	
	Verfügbarkeit, Lagerfähigkeit, Preis	Dosiermöglichkeiten
Wasser	In ausreichenden Mengen kostengünstig verfügbar, leitungsgebunden	Sprüh-/Tröpfchendosierung
Wasserdampf	Nur als Nebenprodukt kostengünstig verfügbar (z. B. Prozessdampf aus Heizkraftwerk); Installation von separatem Dampferzeuger möglich, aber teuer	Sprühdosierung, Stand der Technik
pflanzliches Stearin (Wachse)	Thermoplastisch (Wärmequelle zur Rationierung notwendig, beheizter Konditionierer), hoher Preis	Dosier- und Mischeinrichtungen für hochviskose (dickflüssige) Bindemittel sind in Holzpelletindustrie derzeit nicht verfügbar
Melasse	In Versuchen z. T. gute Erfahrungen mit gemacht, wasserlöslich, moderate Verfügbarkeit und Preis	
Cellulosefasern	Verfügbarkeit gut; Zwischenprodukt der Zellstoffherstellung, aber preisgünstiges Aufschlussverfahren ohne chemische Zusätze begrenzt Einsatzfähigkeit	Keine Erfahrungen bekannt (sollte technisch machbar sein, wenn chemisch unbelastete Fasern verfügbar)
pflanzliche Stärke	Verfügbarkeit gut, Sortiment groß, Aufbereitung relativ teuer, gute Lagerfähigkeit, wasserlöslich	Zumischung in Pulverform Stand der Technik

Entsprechend dieser Eigenschaften sowie vor dem Hintergrund der technischen Dosiermöglichkeiten und Praxisrelevanz beschränkt sich der Bindemittleinsatz bei der Holzpelletierung in der

Praxis üblicher Weise auf Wasser, Wasserdampf und pflanzliche Stärken (z. B. Weizen-, Maisstärke) /2/, /254/. Deshalb konzentrieren sich die nachfolgenden Erläuterungen zum Einsatz normkonformer Bindemittel nur auf die praxisrelevanten Einsatzstoffe, während alternative Bindemittel und Verfahren in Kapitel 2.3.2.2 erläutert werden.

- **Wasser-/Wasserdampf.** Die Bindungsmechanismen und Wirkungseffekte der Wasser-/Dampfzumischung während der Pressgutkonditionierung wurden bereits erläutert. Zusätzlich verbessert sich mit dem Anstieg des Wassergehalts im Pelletierprozess die Gleitfähigkeit des Pressguts. Der notwendige Pressdruck zur Pelletierung sinkt, wodurch der Energieaufwand für die Pressung sowie der Materialverschleiß der Presse (Lebensdauer der Matrizen und Koller) sich reduziert /182/. Wird jedoch ein kritischer Wassergehalt während der Pelletierung überschritten ($> 11 - 12\%$ am Ausgang der Presse) sinkt auch die mechanische Festigkeit der Presslinge dramatisch. Allerdings ist ein zu geringer Wassergehalt der Pellets ($< 8\%$) auch nicht empfehlenswert, da diese Presslinge dann eine höhere Wasseraufnahmefähigkeit gegenüber ihrer Umgebungsluft besitzen (z. B. der Luftfeuchtigkeit in Lagerräumen). In dem Fall quillt das Pellet auf und die Oberfläche bekommt irreversible Risse, die zu sehr hohen Abriebswerten führen können, bis hin zum Zerfall des Pellets /71/, /151/.
- **Stärkehaltige Presshilfsmittel.** Beim Einsatz von stärkehaltigen PHM zur Holzpelletierung kann durch die verklebende Wirkung der Stärken eine höhere Festigkeit der Pellets erreicht werden. Nachfolgend erfolgt zunächst eine Zusammenfassung der in der Literatur /210/, /89/, /141/, /229/, /254/ beschriebenen Erfahrungen mit dem Einsatz einzelner stärkehaltiger Presshilfsmittel zur Holzpelletierung. Anschließend werden alternative PHM und Verfahren mit ähnlicher Zielstellung vorgestellt.

Stärken sind die wichtigsten Reserve- und Speicherstoffe von Pflanzen. Sie bestehen im Wesentlichen aus den beiden Kohlenhydraten Amylose und Amylopektin, die in den Speicherorganen der Pflanzen eingelagert sind. Stärke wird in der Regel aus Pflanzen mit einem hohen Stärkegehalt gewonnen. Das geschieht überwiegend in einem Nassprozess, in dem das vorzerkleinerte (homogenisierte) Rohmaterial mit Wasser aufgeschlämmt und die verschiedenen Bestandteile durch Filtrieren und Zentrifugieren abgetrennt werden.

In Deutschland ist der Einsatz von Getreide- und Kartoffelstärken als Presshilfsmittel für die Holzpelletproduktion weit verbreitet. Die Konzentration und Qualität der Stärkedosierung unterscheidet sich aufgrund verschiedener Stärkeklassen und spezifischer Kenngrößen. Der Grenzwert laut DIN $plus$, EN $plus$ oder EN 14961-2 von maximal 2 % PHM-Einsatz bezieht nicht die Konzentration der Stärke im PHM mit ein sondern limitiert ausschließlich die Zumischungsmenge des PHM im Endprodukt (Kapitel 2.1). D. h., liegt eine preiswerte Stärke mit geringem Stärkegehalt vor, ist eine höhere Dosierung notwendig um einen identischen Stärkegehalt in das Pellet einzubringen, als mit einer hochkonzentrierten Stärke. Der geringere Stärkegehalt der preiswerteren Stärken ist i. Allg. jedoch mit einem höheren Verunreinigungsgrad der Stärke verbunden.

Stärken können in native und modifizierte Stärken unterteilt werden, wobei die modifizierten Stärken weiter nach chemisch oder thermisch modifiziert unterschieden werden. Die Normkonformität im Sinne der DIN $plus$ ist lediglich für die nativen Stärken gegeben; chemisch modifizierte Stärken dürfen in Deutschland nicht zur Premiumpelletproduktion eingesetzt werden. Einen im Einzelfall zu prüfenden Grenzbereich bilden die thermisch modifizierten Stärken, für deren Zulassung ein individuelles Genehmigungsverfahren notwendig ist. Die Modifizierung einer Stärke beeinflusst deren ursprüngliches Wirkungsverhalten (Quellungs- und Verkleisterungseffekte) entweder verstärkend, mindernd oder stabilisierend.

Aus den bestehenden Erfahrungen mit der Holzpelletkonditionierung und -pelletierung lässt sich ableiten, dass die Bindefähigkeit der Stärken im Wesentlichen von der Stärkeart /-sorte und dem Wassergehalt des Mischguts abhängig ist. Die in Pulverform den Holzspänen zugegebenen nativen Stärkekörnchen unterliegen einer begrenzt reversiblen Quellung. Sie sind in kaltem Wasser jedoch unlöslich. Die Bindefähigkeit der Stärkekörner wird von ihrem Gehalt

an Amylopektin bestimmt und verändert sich beim Erwärmen in einer wässrigen Suspension, wenn ein bestimmtes kritisches Temperaturfenster erreicht wird.

- *Temperatur.* Bei der so genannten Quelltemperatur beginnen die Stärkekörner aufzuquellen, verlieren ihre kristalline Molekülstruktur (Hydratisierung der OH-Gruppen) und gehen bei weiterem Erhitzen in Lösung (Verkleisterung). Die Quelltemperatur ist stärke-spezifisch und liegt etwa zwischen 40 bis 55°C. Die Verkleisterungstemperatur gibt an, wenn 50 % der Stärkekörner vollständig gelöst sind (Zerstörung der parakristallinen Struktur). Sie ist ebenfalls individuell für die jeweilige Stärke und liegt tendenziell im Temperaturkorridor zwischen 50 bis 85°C. D. h., je nach Stärke beginnt die Quellung der in Wasser löslichen Stärkekörnchen und deren Verkleisterung bei unterschiedlichen Temperaturen. Diese Verkleisterung ist irreversibel und beruht auf einer Erweichung der amorphen Stärkestruktur unter allmählicher Aufnahme von Wasser und der Lösung von Wasserstoffbrücken. Tabelle 2-8 zeigt eine Übersicht spezifischer Verkleisterungstemperaturen verschiedener Stärken. Ein vollständiger Stärkeaufschluss (Hydrolyse) kann jedoch erst unter Einbringung zusätzlicher thermischer und mechanischer Energie erreicht werden.

Bei der Holzpelletproduktion können die in Tabelle 2-8 genannten Temperaturbereiche im Pressgut mit der derzeit praxisüblichen Technik nur ansatzweise erreicht werden. Bei der Konditionierung mit Heißdampf bzw. auch durch die Reibungswärme während des Pelletiervorganges in der Presse kann es jedoch sogar kurzzeitig zu deutlich höheren Pressguttemperaturen kommen. Zu hohe Temperaturen des Pressguts sind allerdings für die Presswerkzeuge von Nachteil, da sie deren Verschleiß erhöhen. Deshalb ist aus Sicht des Pelletierers eine möglichst geringe Verkleisterungstemperatur der Stärke wünschenswert.

Tabelle 2-8: Verkleisterungstemperatur von ausgewählten Stärken verschiedener Anbieter und Quellen

Literaturquelle	Weizenstärke	Maisstärke	Kartoffelstärke	Wachsmaisstärke ^{a)}
/254/	50 – 70°C	66 – 75°C	-	-
/141/	80 – 85°C	75 – 80°C	56 – 66°C	63 – 72°C
/224/	51 – 64°C	64 – 72°C	-	-

^{a)} Wurzelstärke aus wachsigem Maisvarietäten

- *Wassergehalt.* Das Quellvermögen einer Stärke kann eine Volumenänderung um ein Vielfaches verursachen (Tabelle 2-9). Für eine vollständige Lösung / Verkleisterung von Amylopektin ist ein Wassergehalt von etwa 15 bis 20 % notwendig. Er liegt damit über dem üblichen maximal vorhandenen Wassergehalt im Pressgut vor der Pelletierung von Holzpellets (11 bis 13 %, Kapitel 3.2.2), sowie weit über dem zulässigen Grenzwert nach DINplus (10 % Wassergehalt, Anhang, Tabelle A-3). Deshalb sind bei der Holzpelletierung mit nativen Stärken als PHM auch nach dem Produktionsprozess noch unverkleisterte Stärkekörner in den Presslingen vorhanden.
- *Viskosität.* Mit dem Einsetzen des Verkleisterungsvorgangs erfolgt eine abrupte Steigerung der Viskosität der Stärke, je nach Verdünnung (Wasseranteil). Eine hohe Viskosität der Stärke nach der Abkühlung der Pellets ist wünschenswert, da somit eine höhere mechanische Festigkeit erzielt werden kann.

Neben den diskutierten Kenngrößen Temperatur, Wassergehalt und Viskosität sind weitere Einflussfaktoren zur Charakterisierung des Bindeverhaltens einer Stärke einzubeziehen. Dies sind z. B. die natürliche Zusammensetzung und Verteilung der Inhaltsstoffe (Amylopektin, Amylose, ätherische Öle, Proteine etc.), die Körngröße und der Reinheitsgrad der Stärke. Die Gegenüberstellung verschiedener Stärken in Tabelle 2-9 zeigt eine große Schwankungsbreite dieser spezifischen Kennwerte auf, die unter anderem die Stärkekonzentration und Wirksamkeit beeinflussen.

Tabelle 2-9: Charakteristische Kennwerte ausgewählter Stärken /141/, /235/, /265/

Stärkeart	Stärkegehalt der Pflanzen	Stärkegehalt der genutzten Bestandteile	Durchmesser der Stärkekörner	Quellvermögen
Maisstärke	60 – 70 %	71 %	15 – 25 µm	24-fach
Weizenstärke	55 – 70 %	74 %	25 – 45 µm	21-fach
Kartoffelstärke	12 – 20 %	82 %	20 – 180 µm	> 1 000-fach
Wachsmaisstärke	keine Angaben			64-fach

- *Korngröße.* Während das Molekulargewicht und die Korngrößenverteilung der nativen Stärken von Mais und Weizen vergleichbar sind, weist Kartoffelstärke mehr Stärkemoleküle mit einem höheren Molekulargewicht auf. Stärkekörner aus Weizen haben jedoch einen etwas größeren Korndurchmesser als diejenigen aus Mais (Abb. 2-6). Die relative Größe der Stärkekörner beeinflusst auch deren Quellverhalten. Kleinere Stärkekörner quellen und verkleistern rascher und bei niedrigeren Temperaturen als große, da sie eine größere spezifische Oberfläche aufweisen.

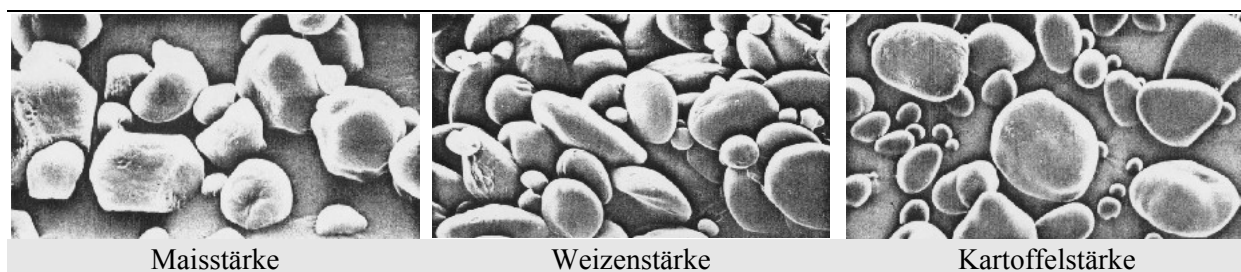


Abb. 2-6: Mikroskopaufnahme der Stärkekörnchen von Mais-, Weizen- und Kartoffelstärke /217/

- *Reinheitsgrad.* Verunreinigungen des Bindemittels können sich negativ auf die Festigkeit der Pellets auswirken, da die zusätzlichen Fremdpartikel sich mit der Stärke vergesellschaften und dadurch die verfügbare Kontaktfläche zu den Holzpartikeln mindern. Der Reinheitsgrad jeder Stärke variiert in Abhängigkeit vom Gewinnungsprozess des Herstellers. Deshalb können zusätzliche Angaben zum Herstellungsprozess, dem angewandtem Trocknungsverfahren und dem Wassergehalt der Stärke als zusätzliche Hinweise zur charakteristischen Einordnung der Stärke genutzt werden.
- *Inhaltsstoffe, Molekularstruktur.* In nativen Stärken sind Salze enthalten, die das Ascheschmelzverhalten sowie die Aschezusammensetzung des Holzes beeinflussen können. Dagegen weisen modifizierte Stärken geringere Salzfrachten und kürzere Stärkemoleküle auf, weshalb sie mitunter für die Pelletierung besser geeignet sind. Durch die chemische oder physikalische Vorbehandlung der Stärke kann auch deren Verkleisterungstemperatur gesenkt werden. Bei dem rein physikalischen Verfahren der Stärkemodifizierung durch Wärmebehandlung wird das Stärkemolekül selbst nicht verändert und keine Reagenzien eingebracht, welches essentielle Voraussetzungen für die Genehmigungsfähigkeit für den Einsatz zur Premiumpelletproduktion darstellen. Durch die thermische Vorbehandlung wird das Stärkekorn lediglich aktiviert, so dass es schon bei der Zugabe von Wasser bei Raumtemperatur zur Verkleisterung kommt. Deshalb wird bei der Verwendung der so genannten „kaltquellenden“ Stärken eine höhere Löslichkeit der Stärkekörner vermutet.

2.3.2.2 Alternative Bindemittel und Verfahren

Aufgrund der unterschiedlichen Rohstoffvorkommen und gesetzlichen Rahmenbedingungen zum Einsatz von Holzpellets werden regional und national unterschiedliche Zielstellungen bei der Optimierung der Pelletproduktion verfolgt. Nachfolgend wird deshalb nur eine Auswahl an alternativen Bindemitteln und Verfahren präsentiert, in deren Fokus direkt oder indirekt die Erhöhung der Pelletfestigkeit steht.

- **Alternative Bindemittel.** Den alternativen Bindemitteln werden Additive mit nicht vollständig geklärter Zulassungsberechtigung oder chemisch veränderte bzw. verunreinigte Substanzen zugeordnet, die dem Spanmaterial vor der Pelletierung beigemischt werden.
 - *FlourBond.* FlourBond wird als multifunktionales PHM vertrieben, das nicht nur die Fließ- und Presseigenschaften des Pressguts verbessert, sondern durch seinen hohen Kalziumgehalt auch das Ascheschmelzverhalten der Pellets positiv beeinflussen und somit Verschlackungsprobleme vermeiden soll /246/. Damit ist FlourBond eines der ersten industriell hergestellte Bindemittel dar, das neben der Verbesserung der physikalisch-mechanischen auch die chemisch-stofflichen Brennstoffeigenschaften beeinflusst und somit eine Kombination zwischen Bindemittel und Zuschlagstoff präsentiert.
 - *Lignin.* Die Zumischung von zusätzlichem Lignin als Bindemittel zur Holzpelletierung bietet sich aufgrund der nachweislichen Bindungskräfte des Lignins und der guten Schmiereigenschaften der Substanz an (Kapitel 2.2.1). Dadurch kann die Durchsatzleistung der Pelletproduktion schätzungsweise um bis zu 30 % gesteigert werden /141/. Lignin fällt in großen Mengen als Nebenprodukt der Zellstoffindustrie an und als Ligninsulfat in einigen Unternehmen z. T. bereits für die Industrieholzpelletproduktion verwendet⁸. Für die Premiumpelletproduktion scheidet der Lignineinsatz an einem zulässigen kostengünstigen Verfahren zur Ligninseparation, bei dem keine chemischen Zusätze verwendet werden /151/.
 - *Wasserstoffperoxid.* H₂O₂ scheint aufgrund seiner chemischen Struktur und der kostengünstigen Verfügbarkeit ein viel versprechender chemischer Aktivator der Spanmasse zu sein, weist jedoch keine Normkonformität auf. Untersuchungen mit unterschiedlichen Dosiermengen (max. 2,5 %) haben gezeigt, dass sich holzartiges Rohmaterial während der Einwirkzeit des H₂O₂ aufhellt und dabei selbständig erwärmt (12 bis 16 K in 30 min). Der Energieeinsatz zur Pelletierung kann dadurch gesenkt und die Durchsatzleistung der Presse um etwa 10 % steigen werden. Der Wassergehalt, Abrieb und Rohdichte der Pellets erreicht etwa vergleichbare Werte wie unbehandelte Pellets. Aufgrund der exothermen Reaktion sinkt während der H₂O₂-Einwirkung jedoch der Heizwert der Pellets leicht /89/, /182/.
- **Alternative Verfahren.** Den alternativen Verfahren werden prozesstechnische Maßnahmen zugeordnet, die sich auf die Materialaufbereitung bzw. Nachbehandlung fokussieren, die mit der konventionell vorhandenen technischen Ausstattung der Marktakteure (Kapitel 3) nicht möglich sind oder damit noch unzureichende Erfahrungen bestehen.
 - *Dampfexplosionsverfahren.* Eine Möglichkeit die natürlichen Bindungskräfte des holzeigenen Lignins besser nutzen zu können, bietet die Konditionierung des Pressguts mit dem Dampfexplosionsverfahren. Durch die schlagartige Entspannung der Atmosphäre in einem Hochdruckreaktor verdampft das im Fasermaterial enthaltene Lignin explosionsartig und zerreißt dabei die Struktur des pflanzlichen Zellgewebes. Anschließend liegt das Spanmaterial als nasse dunkelbraune Holzfasermasse vor. Mit der Pelletierung dieses Materials können Pellets mit einer hohen Festigkeit und einer erhöhten Rohdichte (850 kg/m³) hergestellt werden. Aufgrund der günstigen Pelletiereigenschaften des Pressguts ist bei einem kommerziellen Betrieb eine Steigerung des spezifischen Pressdurchsatzes um bis zu 100 % möglich. Trotzdem scheidet die Umsetzung des Verfahrens bisher noch an den Voraussetzungen für einen wirtschaftlichen Betrieb dieser Technologie /89/, /210/, /243/.
 - *Holzerstörende Pilze.* Schließlich können neben den direkt für die Holzpelletproduktion bereits getesteten oder adaptierten Verfahren auch Forschungsergebnisse aus anderen Branchen der Holzindustrie genutzt werden. Im Bereich der Spanplattenindustrie wurde beispielsweise die Aufspaltung der Holzpartikel durch Pilze untersucht. Dabei zeigte sich, dass bereits teilaufgeschlossenes Holz – verursacht durch holzerstörende Pilze – nicht nur

⁸ z. B. im Holzpelletwerk der EPC in Torgau zur Herstellung von Industriepellets (Stand: Frühjahr 2009)

zu einer Energiesenkung für die Zerkleinerung der Rohstoffe führt, sondern dass anschließend auch erheblich weniger Presshilfsmittel zur Verkleisterung der aufgeschlossenen Fasern benötigt werden /112/, /141/.

- *Holzaufschluss durch Fermentation.* Ebenfalls aus der Spanplattenindustrie liegen Untersuchungen zum Holzaufschluss durch Fermentation von Hackschnitzeln vor. Dadurch wird einerseits der Energiebedarf bei der Zerkleinerung und der Bindemittelverbrauch bei der Pressverdichtung gesenkt und andererseits die Qualität der Faserplatten erhöht. Eine Herausforderung stellt dabei jedoch die Sicherstellung steriler Bedingungen während des industriellen Produktionsprozesses dar, da ansonsten Schimmelpilze auftreten können, die den Fermentationprozess verhindern. Eine Option der nicht sterilen Fermentation könnte die oxidative Veränderung des Lignins zu einem reaktiven Leim bieten, welcher als ein besonders gutes Bindemittel gilt /125/, /141/.

Für beide zuvor beschriebenen Verfahren der Spanplattenindustrie sind bisher keine Erfahrungen in der Holzpelletproduktion bekannt. Untersuchungen zur Anwendbarkeit und zur Lagerfähigkeit des behandelten Holzes (bzw. der Pellets) sind deshalb notwendig, um eventuell anknüpfende Reaktionen und gesundheitliche Bedenken auszuschließen.

- *Coating.* Als Coating wird das Aufbringen (mittels Sprüh- oder Tauchverfahren) einer bzw. mehrerer festhaftenden Schichten auf der Oberfläche eines Produktes bezeichnet. Besonders wichtig beim Coating ist die Normkonformität des Coatingmittels, die im Einzelfall geprüft werden muss. Die Wirksamkeit verschiedener Coatingmittel (pflanzliche Öle, Stärken, Glutin, Kasein, Wachse, fossiles Paraffin) bei unterschiedlichen Coatingtemperaturen wurde in mehreren Versuchen mit Holzpellets bereits getestet. Insbesondere die in 100°C heißes Paraffin getauchten Pellets wiesen eine um bis zu 98 % höhere Wasserresistenz als unbehandelte Pellets auf und konnten somit ihre Lagerfähigkeit deutlich verbessern. Mit anderen Coatingmitteln konnte immerhin eine mind. 67 % erhöhte Wasserresistenz erzielt werden. Eine kommerzielle Weiterentwicklung des Tauchverfahrens scheiterte bisher jedoch an dessen ökonomischer Darstellbarkeit und der ökologischen Tragfähigkeit des Einsatzes von Erdölderivaten für Holzpellets. Die Coatingmittel mit den vorteilhaftesten Eigenschaften setzten eine hohe Einsatzmenge voraus (um Wasserresistenz zu gewährleisten) und sind deshalb sehr kostenintensiv. Eine Sprühauftragung der Coatingmittel erzielte bei den Versuchen in Österreich zunächst keinen Erfolg /71/, /89/, /141/.

Seit 2009 wird das Coating-Verfahren in Deutschland jedoch wieder belebt. Die Holzpellets werden während des Entladens aus dem Tankwagen mit einem Sprühnebel aus Bioöl überzogen, der die gesamte Brennstoffoberfläche mit einer Schutzschicht überzieht (ca. 1 ml/kg). Dadurch wird diese geglättet und resistenter gegenüber mechanischer Beanspruchung. Die Freisetzung und Aufwirbelung von Stäuben und Feinanteilen kann während des Einblasvorgangs der Pellets in das Lager reduziert werden und auch während der Brennstofflager- und Förderung soll ein vermindertes Pelletabrieb zur Steigerung der Funktionsfähigkeit der Fördereinrichtungen beitragen⁹ /120/, /167/.

Neben den in Kapitel 2.3.2.1 und 2.3.2.2 aufgeführten Ansätzen zu Optimierung der Pelletfestigkeit bzw. zur Reduktion des Feinanteils von Holzpellets existiert eine große Bandbreite an untersuchten Zuschlagstoffen, für die bisher jedoch eher Erfahrungen mit halmgutartiger Biomasse bestehen. Dies gilt z. B. für den Einsatz von Kalkstein, Dolomit-, Brand- oder Feinkalk, Tonerde und Kaolin zur Verbesserung des Ascheschmelzverhaltens oder für die Beimischung von Raps- oder Sonnenblumenöl zur besseren Schmierfähigkeit /103/, /113/, /114/, /141/, /143/, /182/, /254/.

⁹ Wissenschaftliche Langzeituntersuchungen zur Wirksamkeit des „Pelprotec“-Veredlungsverfahrens liegen bisher nicht vor. Insbesondere die Möglichkeit der Lagerverschmutzung durch die Ablagerung / Anhaftung der Ölbeschichtung an den Lagerflächen und Brennstofffördersystemen sowie ein eventuell erhöhtes Risiko zur Selbstentzündung der Pellets (Eintrag von ungesättigten Fettsäuren, je nach verwendeten Öl → Anhang, Kapitel 3.3.2) wurden bisher nicht ausreichend untersucht.

3 TECHNISCHE BESCHREIBUNG DER PROZESSKETTE

Ziel der folgenden Darstellung der Prozesskette ist es, die für die Pelletherstellung verfügbaren Holzsortimente entsprechend ihres Aufbereitungsaufwandes zu strukturieren, um darauf aufbauend die Teilprozesse und technischen Komponenten der Brennstoffproduktion zu beschreiben: von den Möglichkeiten der Rohstoffaufbereitung, Konditionierung, Pelletierung bis zur Abfüllung und (Zwischen-)Lagerung. Anschließend wird kurz auf die Besonderheiten des Pellettransports zum Lieferanten oder Endverbraucher (Distribution) sowie des Holzpelleteinsatzes zur Wärmebereitstellung in Kleinfeuerungsanlagen eingegangen (Abb.3-1).



Abb.3-1: Prozesskette der wesentlichen Verfahrensschritte der Pelletbereitstellung bis zum Endkunden

Der Fokus dieser Betrachtung liegt bei den technischen Möglichkeiten, die jeder Prozessabschnitt bietet, um aus dem verfügbaren Rohstoffsortiment mit konventioneller Technik ein möglichst homogenes Endprodukt bereitzustellen, das den spezifischen Brennstoffanforderungen des Kunden entspricht. Dazu sollen aus der Prozesskettenbetrachtung die Möglichkeiten der Pelletproduktion zur bewussten Beeinflussung der Brennstofffestigkeit durch die Variation bestimmter Betriebsparameter abgeleitet werden.

3.1 Rohstoffbereitstellung

Für die Produktion von Holzpellets stellen Industrieresthölzer mit einem möglichst niedrigen Wassergehalt das typische Ausgangsmaterial dar. In Deutschland sind dies derzeit etwa 70 bis 85 % des Gesamtrohstoffeinsatzes zur Holzpelletproduktion (Kapitel 2.2.1). Die Anlieferung des Holzes erfolgt überwiegend in Form von Spänen, Sägemehl oder als Kappstücke (teilweise bereits gehackt) mit unterschiedlichen Abmessungen. Die Hölzer fallen typischer Weise als Koppelprodukte in Sägewerken bei der Schnittholzproduktion oder als Abfallprodukte der Holzwerkstoffindustrie bei der Holzbe- oder -verarbeitung an und liegen rindenfrei oder mit nur geringen Rindenanteilen vor. Der Wassergehalt dieser Rohstofffraktion orientiert sich an der Rohholzfeuchtigkeit (beim Einschnitt im Sägewerk) bzw. dem Wassergehalt des Hauptproduktes (Holzwerkstoffindustrie) und den Lagerbedingungen der Resthölzer. Im Durchschnitt liegt der Wassergehalt des Materials zwischen 35 und 60 % und bedarf einer technischen Trocknung. Deshalb werden zur Pelletproduktion bevorzugt Hobelspäne aus der Möbelproduktion eingesetzt, deren Wassergehalt – und meist sogar die Korngröße des Materials – ohne weitere Aufbereitungsschritte nahezu exakt den Anforderungen der Pelletierung entsprechen /152/. Die Verfügbarkeit von Hobelspänen am Markt ist jedoch sehr begrenzt.

Zu einem kleineren Anteil von ca. 15 bis 30 % werden in der Holzpelletproduktion Frischhölzer (u. a. Industrierundhölzer oder minderwertiges Stammholz aus Wäldern mit Sturmschäden oder Borkenkäferbefall – so genannte Kalamitäten) als Rohmaterial verwendet (Abb. 2-3). Der Einsatz schnell wachsender Baumarten, wie Pappeln oder Weiden aus dem Anbau von Plantagenhölzern mit mehrjährigen Erntezyklen (KUP), wird vielerorts diskutiert – bisher jedoch an nur wenigen Standorten in Europa realisiert¹⁰ /45/, /200/, /214/.

¹⁰ In Deutschland wurden im Jahr 2011 nur etwa 6 000 ha Energiepflanzen für die Festbrennstoffbereitstellung kultiviert (vorrangig KUP und Miscanthus), wovon eine marginale Menge zur Pelletproduktion genutzt wird /64/.

Frischhölzer werden direkt als Holzhackschnitzel (HHS), in Form von Rundhölzern oder als Holzbündel¹¹ mit Wassergehalten zwischen 45 bis 65 % zum Pelletwerk transportiert und sind in der Regel rindenbehaftet. Das bei der Entrindung von Rundhölzern anfallende Material kann – je nach Brennstoffanforderungen – auch zur Holzpelletproduktion genutzt werden. Um den technischen Trocknungsaufwand für das Frischholz zu reduzieren, stellt die Lufttrocknung eine Option dar. Nach der Abtrocknung des Holzes erfolgt die Verarbeitung zu HHS, die dann wesentlich bessere Transport- und Lagereigenschaften als erntefrisch gehacktes Material aufweisen. Da die Frischholzernte und –aufbereitung zur Pelletierung einen aufwändigen Produktionsprozess mit mehreren zusätzlichen Verfahrensschritten bedingt (u. a. Entrinden, Hacken, Trocknen), wird diese Rohstofffraktion immer nur eine Alternative zum Industrierestholzeinsatz darstellen.

Entsprechend der DIN EN 14961-1 können alle relevanten Einsatzstoffe zur Holzpelletproduktion, je nach Herkunft bzw. Anfallort, den übergeordneten Sortimenten „Wald- und Plantagenholz“ (1.1) oder „Industrierestholz“ (1.2) zugeordnet werden (Abb. 2-3). Gemäß den in Deutschland geltenden Brennstoffanforderungen an Holzpellets sind chemisch behandelte Hölzer als Rohmaterial für die Pelletproduktion auszuschließen (Kapitel 2.1.1).

In Abb. 3-2 sind alle potenziellen Holzsortimente entsprechend ihres Vorkommens (Herkunft und Anfallort), der möglichen Rohmaterialaufbereitungsstufen und ihrer Anfallform vor der Anlieferung im Pelletwerk klassifiziert. Wird unaufbereitetes bzw. nur teilweise aufbereitetes Holz zur Brennstoffproduktion bereitgestellt, erfolgt die (weitere) Aufbereitung des Materials im Pelletwerk (Kapitel 3.2).

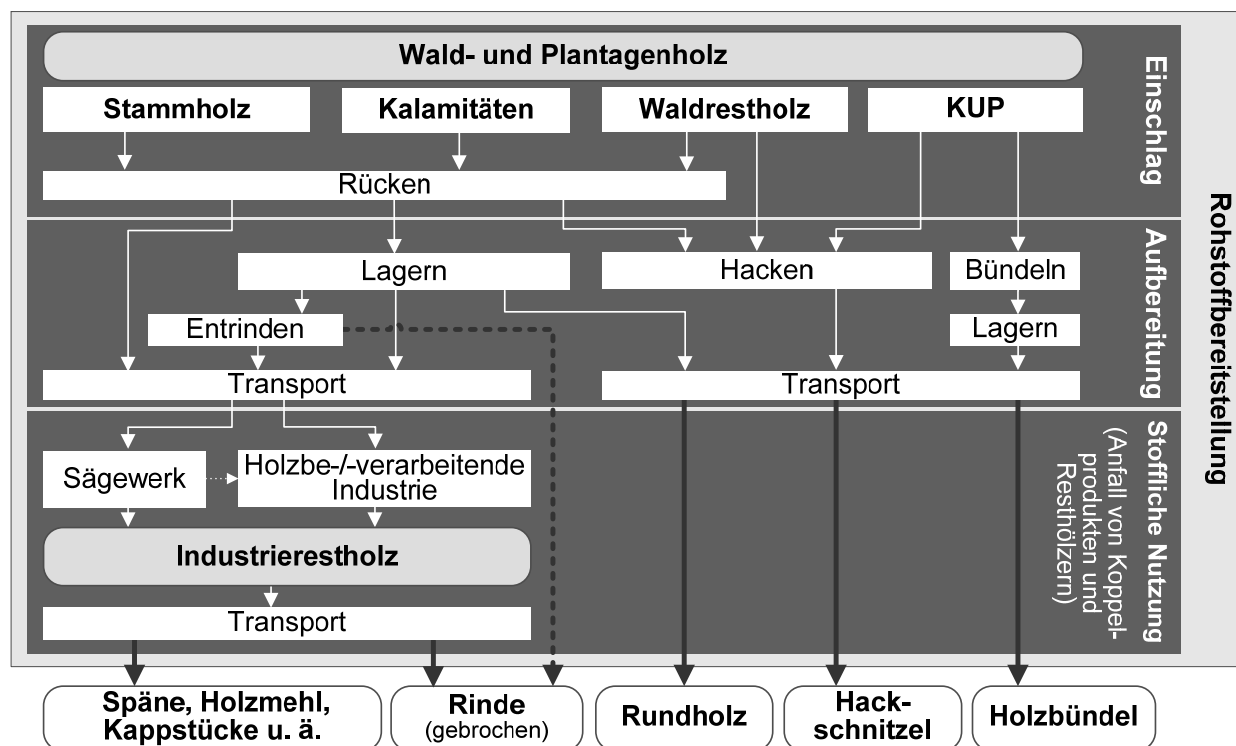


Abb. 3-2: Optionen der Rohmaterialbereitstellung für die Pelletproduktion, Einordnung potenzieller Holzsortimente nach DIN EN 14961-1 in Wald- und Plantagenholz sowie Industrierestholz

¹¹ Erfahrungen mit der Pelletierung von Holzbündeln sind bisher gering. Praxisversuche mit Waldrestholz bündeln konnten bisher keine nennenswerten technischen Vorteile in Bezug auf die Pelletierung des Materials aufzeigen, da der hohe Grüngutanteil zwischen den Hölzern (Nadeln, Laub und Schmutz) einen hohen Verunreinigungsgrad des Holzes darstellt. Da KUP-Hölzer jedoch in den Wintermonaten gererntet werden, ist von einem geringeren Laubanteil zwischen den Ruten auszugehen.

3.2 Brennstoffproduktion

Im Pelletwerk erfolgt die Brennstoffproduktion, die in die folgenden technischen Verfahrensschritte untergliedert werden kann: Aufbereitung des Rohmaterials, Konditionierung des Pressguts, Pelletierung und Lagerung (Abb. 3-3). Sie werden nachfolgend erläutert.

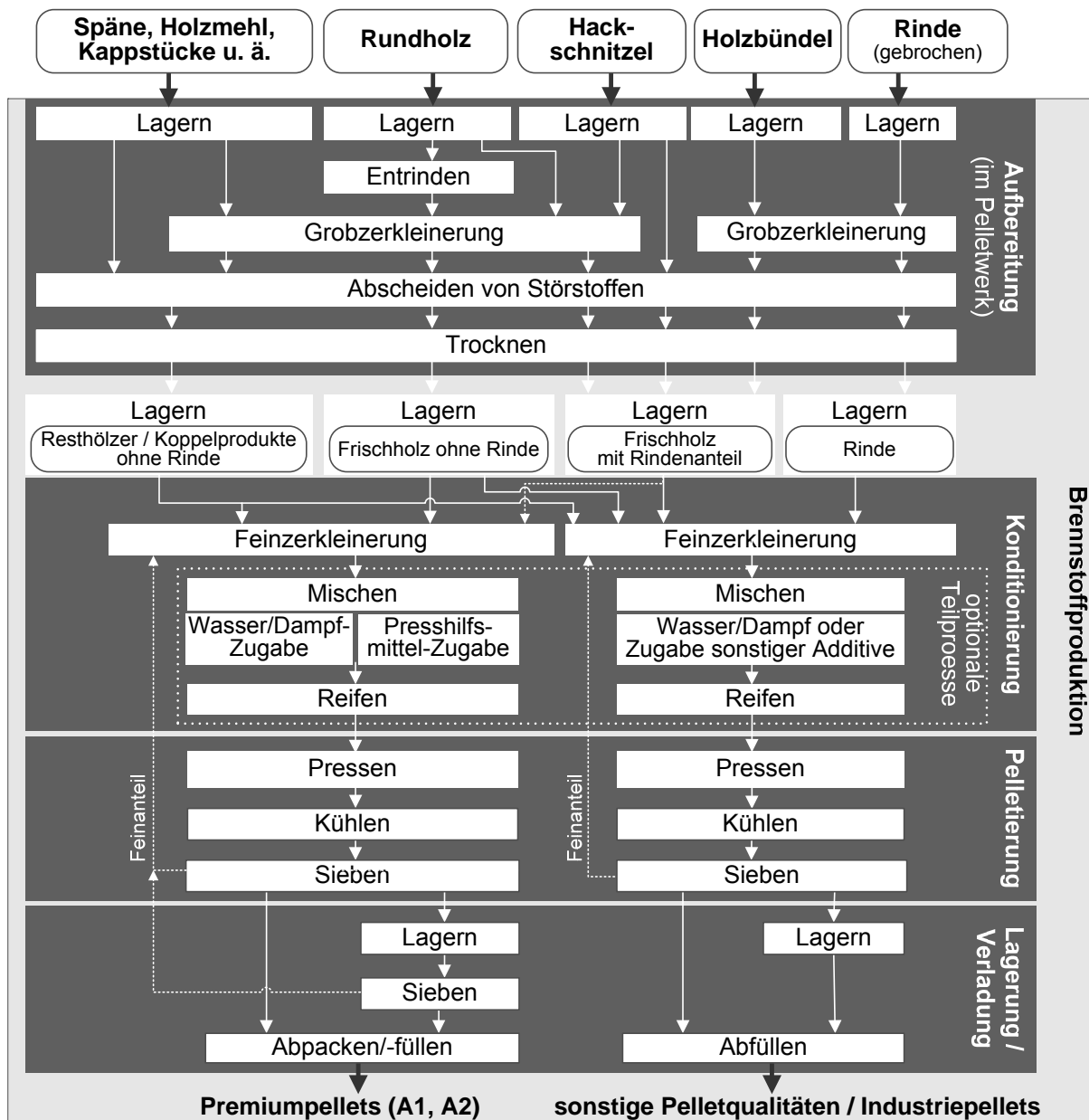


Abb. 3-3: Schematische Übersicht des Pelletproduktionsprozesses mit unterschiedlichen Rohstoffsortimenten und verschiedenen Brennstoffanforderungen an das Endprodukt

Als Eingangsmaterial zur Produktion von Premiumpellets können somit zerkleinerte (Späne, Holzmehl, HHS) und unzerkleinerte Hölzer (Kappstücke, Rundhölzer etc.) zur Verfügung stehen. Aufgrund der erhöhten Mineralstoff- und Schwermetallgehalte in Rindenmaterial (Kapitel 2.2.2) wird für die Produktion von A1-Klasse-Pellets kein Rindenholz verwendet (Anhang, Tabelle A-3). Die Beimischung geringer Rindenanteile ist bei der Herstellung von A2-Klasse-Pellets nach DIN EN 14961-2 zulässig, wenn dennoch den brennstofftechnischen Anforderungen genügt wird (z. B. hinsichtlich Aschegehalt) /188/. Wohingegen für die Industriepelletproduktion der Einsatz von Rinde oder nicht entrindeten Frischholzsortimenten eher unproblematisch ist.

In Pelletwerken mit hohen Produktionskapazitäten und unterschiedlichen Endproduktqualitäten werden zur Effizienzsteigerung und Qualitätssicherung komplett getrennte Prozesslinien je

Rohmaterialklasse installiert – von der Rohmateriallagerhaltung bis zum zeitaufwändigen Freihäfen / Säubern der technischen Aggregate beim Wechsel der Produktlinien vermieden werden.

Für die Auswahl der technischen Prozesskomponenten im Pelletwerk stellen somit neben der Holzart und dessen Stückigkeit auch der maximale Wasser- und Rindengehalt des Rohmaterials wichtige Eingangsgrößen dar /152/. Weiterhin sind Angaben zum Holzalter und der Lagerdauer des Materials vor und seit der Anlieferung ins Pelletwerk von Bedeutung, um die Feinjustierungen der technischen Prozesse vornehmen zu können. Alle diese Parameter entscheiden darüber, welche Techniken zur Holzaufbereitung, der eventuell notwendigen Entrindung, Zerkleinerung und Trocknung zum Einsatz kommt und schließlich auch, welcher Energie- und Zeitaufwand für alle Arbeitsschritte benötigt wird.

3.2.1 Aufbereitung

Der Prozess Rohholzaufbereitung im Pelletwerk beginnt mit der Materialannahme vom Lieferanten und der Vorbereitung des Materials entsprechend den Anforderungen der Konditionierung.

3.2.1.1 Lagern (nass) und Transport

Das angelieferte Rohmaterial zur Pelletproduktion wird in der Regel im Freien auf einem befestigten Untergrund sortenrein gelagert. Während Rundhölzer zunächst entrindet und gehackt werden, entscheidet bei HHS die angelieferte Hackgutgrößenklasse darüber, ob eventuell eine zusätzliche Grobzerkleinerung notwendig ist (Kapitel 3.2.1.3).

Wird das Holz bereits in Form von Sägespänen angeliefert, kann das Material direkt zur Trocknung geleitet werden. Dafür wird die Spanmasse vom Nassspanlager beispielsweise mit einem Schaufelradlader aufgenommen und auf einen überdachten Schubboden aufgebracht. Der Radladerfahrer befüllt den Schubboden dabei – zum Ausgleich der leicht abweichenden Rohmaterialqualitäten je Lieferung – bewusst von unterschiedlichen Lagerstellen. Der Schubboden befördert die Spanmasse zu einer Austragungsschnecke, die das Rohmaterial dosiert auf ein Transportband gibt und zur Störstoffabscheidung transportiert (Kapitel 3.2.1.4).

Beim Transport des Schüttguts im Pelletwerk werden immer wieder kleine Holzpartikel aufgewirbelt, weshalb hohe Staubkonzentrationen entstehen können. Deshalb und zur Vermeidung des Schmutz- und Feuchtigkeitseintrags wird das Schüttgut auf überdachten / eingehausten Fließbändern oder in geschlossenen Kanälen per Druckluft mittels eines Saug-/Zuggebläses befördert.

3.2.1.2 Entrinden

Zur mechanischen Entfernung der Rinde von Rundhölzern wird üblicher Weise eine Entrindungstrommel genutzt, die aus einem leicht geneigtem beidseitig offenen Stahlzylinder besteht, in dessen Hohlraum die Stämme zugeführt werden. Durch die Rotation des Zylinders werden die Stämme in Bewegung versetzt, so dass sie sich aneinander abschaben, die Rinde sich so ablöst und zerkleinert wird. Gleichzeitig bewegen sich die Stämme aufgrund der Trommelneigung in Längsrichtung vorwärts und werden am anderen Ende der Trommel wieder ausgetragen. Die von den Stämmen abgelöste Rinde wird durch längliche Rindenabzugsschlitze in den Trommelmantel ausgetragen. Dabei treten geringe Holzverluste auf, die je nach Holzqualität und Betriebsweise der Entrindungsmaschine zwischen 1,5 und 5 % schwanken.

In der Praxis wird die Effektivität und Qualität der Entrindung nicht nur von der angewandten Maschinenteknik sondern auch von der Holzart, der Jahreszeit und Temperatur beeinflusst. Um die Temperatureinflüsse zu reduzieren, kann das Stammmaterial vor dem Entrinden erwärmt werden oder es kann Wärme in Form von Wasser bzw. Dampf in die Entrindungstrommel geleitet werden, damit eventuell in oder an den Stämmen vorhandenes Eis auftaut /160/, /200/.

3.2.1.3 Grobzerkleinerung (Nassvermahlung)

Beim Einsatz von Rundholz (mit oder ohne Rinde) und Hackschnitzeln zur Pelletproduktion erfolgt die Zerkleinerung des Rohmaterials meist in zwei Stufen: der Grobzerkleinerung vor und der Feinzerkleinerung nach der Trocknung des Rohmaterials.

Die Grobzerkleinerung des Holzes ist notwendig, um eine definierte Kantengeometrie, Oberflächenstruktur und -größe des Rohmaterials zu erreichen und somit dessen Transport- und Fließigenschaften im Produktionsprozess zu verbessern sowie die Holz Trocknung zu beschleunigen. Aufgrund dieser Rahmenbedingungen werden in Pelletwerken kaum Schredder oder Zerspanern zur Grobzerkleinerung von Frischhölzern verwendet. Üblich ist eher der Einsatz von mobilen oder stationär arbeitenden Hackern (Trommel-/Rotor-, Scheiben-, Flügel- oder Schneckenhacker) mit scharfen Schneidwerkzeugen /103/, /128/. In stationären Anlagen sind Trommelhacker mit Elektroantrieb weit verbreitet, die aus einer horizontal rotierenden Trommel mit verschieden angeordneten Messern bestehen (Abb. 3-4).

Bei einer im Pelletwerk integrierten Rundholzaufbereitung kann die zur Verfügung gestellte Menge an HHS gezielt auf den Brennstoffproduktionsbedarf vor Ort abgestimmt werden. Somit ist es möglich, nicht nur flexiblere Rohstofflagerzeiten zu gewährleisten (reduzierte Schimmelbildung und biologischer Zerfall bei Rundhölzern gegenüber HHS und Spänen), sondern u. a. auch Verunreinigungen durch eine unsaubere Holzlagerung, durch Regen, Schnee oder während des Transports weitestgehend zu vermeiden.

Beim Einsatz von Hackschnitzeln zur Pelletierung empfiehlt sich vor der Trocknung ebenfalls eine Grobzerkleinerung zur Homogenisierung des Wassergehalts, der Schnittzelgeometrie und der damit einhergehenden Verbesserung der Trocknungseigenschaften¹². Üblicherweise werden dafür ebenfalls Hacker oder Mühlen verwendet, weshalb der Grobzerkleinerungsprozess oft auch Nassvermahlung genannt wird.

In Hammermühlen sind auf einem Rotor Hartmetallschläger (Hämmer) angebracht, die das Rohmaterial gegen die an der Gehäusewandung angebrachten Prallplatten schleudern, wo die Zerkleinerung der Späne erfolgt /152/. Der Energieverbrauch einer derartigen Mühle schwimmt mit steigendem Wassergehalt der Biomasse an, da die Prallwirkung der Hämmer und damit der Materialdurchsatz sinkt bzw. die Dimensionierung der Mühle steigt (Abb. 3-4). Deshalb werden Hammermühlen eher zur Feinzerkleinerung der getrockneten Spanmasse eingesetzt /56/, /103/.

Alternativ werden z. B. Kollermühlen zur Nassvermahlung eingesetzt, die durch ihre schneidende /scherende Beanspruchung die Spanpartikel zermahlen /226/. Bei der Zerkleinerung von Rinde, haben sich Schneidmühlen bewährt, da das sehr feuchte Material leicht zu Verstopfungen in den Zerkleinerungswerkzeugen neigt /152/.

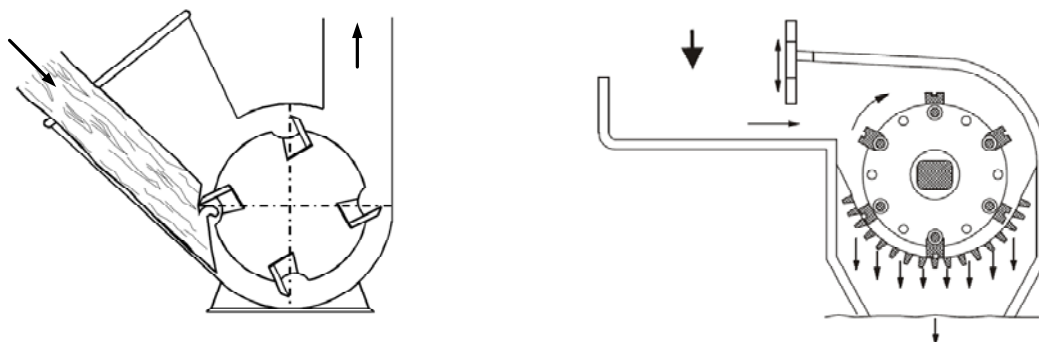


Abb. 3-4: Prinzip eines Trommelhackers (links) und einer Hammermühle (rechts) zur Zerkleinerung holzartiger Biomasse /103/

¹² Durch die Nassvermahlung von HHS vor dem Trocknungsprozess kann eine Effizienzsteigerung des Trocknungsprozesses um bis zu 20 % erreicht werden /67/.

3.2.1.4 Abscheiden

Nach der Grobzerkleinerung des Ausgangsmaterials müssen anschließend unerwünschte Verunreinigungen und Störstoffe im Rohmaterial (z. B. Steine, Metallteile von Bearbeitungswerkzeugen und Fahrzeugen) mittels Sieben, Steinfallen und Metallabscheider ausgeschleust werden, um Beschädigungen des Transportbandes beim Trockner und einen erhöhten Verschleiß oder Defekte an den Schneidwerkzeugen der Mühlen und in der Pressen zu vermeiden. Gleichzeitig wird so die Reinheit – und damit die Qualität – der Holzpellets verbessert und spätere Störfälle während der Brennstoffförderung und Verbrennung reduziert. Insbesondere beim Einsatz von kritischem Rohmaterial (z. B. Hölzer von Truppenübungsplätzen) kann deshalb zur Risikominimierung auch der Einsatz mehrerer Abscheider während der Rohstoffaufbereitung sinnvoll sein.

Metallabscheider können mittels eines Magneten über dem Spanförderband bzw. der Spantransportrinne oder elektrostatisch arbeiten. Letztere Variante wird häufig nach dem Trockner installiert und unterzieht das Spanmaterial in einem kleinen Zwischenbunker einer Magnetfeldumkehr, wobei mittels Sensoren verdächtiges Material schubweise ausgeschleust wird. Elektrostatische Metallabscheider erkennen Verunreinigungen bis 1 mm Größe sehr zuverlässig /178/.

3.2.1.5 Trocknen

Das feuchte Rohmaterial wird nun technisch getrocknet, bis die Späne einem Wassergehalt zwischen 10 bis 15 % aufweisen. Innerhalb dieser Spanne wird je nach Produktionsstandort und der vorhandenen Prozesstechnik eine sehr enge Schwankungsbreite des Wassergehalts von maximal +/- 1 % angestrebt /103/, /139/, /139/, /161/, /178/, /242/. Die Spantrocknung erfolgt mittels direkt (z. B. Trommeltrockner) oder indirekt befeuerten Trocknern (z. B. Röhrenbündel-, Band- oder Heißdampftrockner).

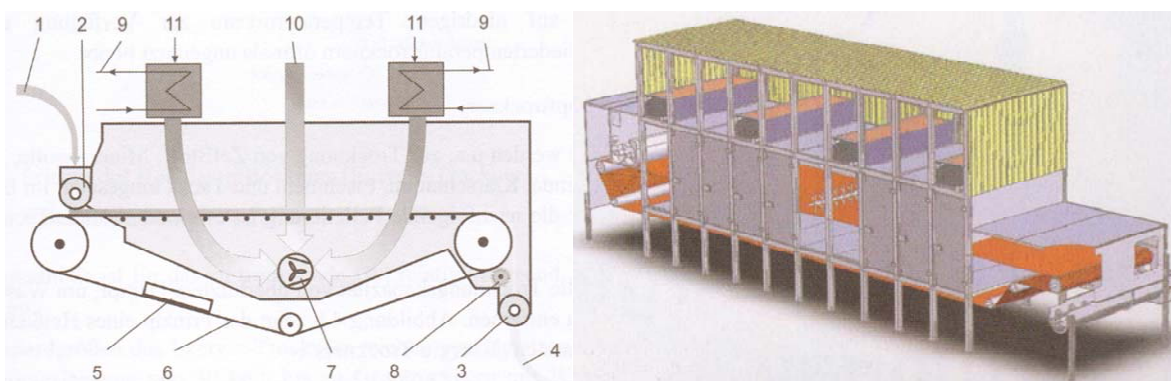
- **Direkte Trocknung.** In direkt befeuerten Trocknern wird ein Heißgas direkt auf oder durch die Biomasse geleitet, wodurch spezifisch geringere Trocknungszeiten als bei der indirekten Trocknung realisiert werden können. Bei der Verwendung von Heißgas in Form von Abgas (in der Regel aus der Verbrennung von Festbrennstoffkesseln) oder Prozessabluft besteht jedoch ein erhöhtes Brandrisiko und die Gefahr einer Übertrocknung der Spanmasse. Zusätzlich werden durch die hohen Eintrittstemperaturen der Heißgase zwischen 300 und 600°C flüchtige organische Bestandteile des biogenen Trockenguts einschließlich seiner natürlichen Bindemittel freigesetzt (z. B. Harze, Lignin). Sie verdampfen und werden mit der Trocknerabluft abgeführt. Damit wird einerseits der Heizwert des Pelletrohmaterials gesenkt und andererseits fehlen die Extraktstoffe als natürliche Bindemittel während der Pelletierung zur Stabilisierung der Pellets /139/, /152/. Weiterhin können im Heißgas enthaltenen Schadstoffgehalte sich durch den direkten Kontakt mit der Biomasse an dem Trockengut anlagern, aufkonzentrieren und später als Brennstoffpellets technische Probleme verursachen, z. B. bei der Einhaltung der gesetzlichen Emissionsgrenzwerte für Biomassefeuerungen oder durch eine erhöhte Verschlackungsneigung /154/.
- **Indirekte Trocknung.** Bei indirekt befeuerten Trocknern wird das Heizmedium nicht direkt mit dem Trockengut in Berührung gebracht, sondern durch einen Wärmeübertrager auf das Trocknungsmedium (Luft oder Wasserdampf) übertragen. Dazu wird überwiegend Abwärme aus Dampf- oder ORC-Prozessen verwendet bzw. die Abwärme von Abgaskondensationsanlagen, womit Vorlauftemperaturen zwischen 90 und 210°C erzielt werden. Das am Standort verfügbare Temperaturniveau der Wärmequelle bestimmt die Dimensionierung des Trockners.

Der Wärmebedarf derartiger Trockner liegt je nach Witterungsverhältnissen bei 0,9 bis 1,2 MWh/t zu verdampfendem Wasser und damit meist über denen von Trommel- oder Röhrenbündeltrocknern mit ca. 1,0 MWh/t. Trotz der etwas höheren Investitionskosten eines Bandtrockners gegenüber vergleichbaren Trocknungssystemen bietet das niedrige Temperaturniveau der Luftein- und Austrittstemperaturen bei Bandtrocknern (ca. 90 bis 110°C zu 60 bis 70°C) viele Möglichkeiten zur Kompensation der hohen Anfangsinvestition durch die

Nutzung von Abwärme /152/, /178/. Deshalb werden Bandtrockner derzeit auch in über 90 % der Pelletwerke in Deutschland zur Spantrocknung eingesetzt. Ihre Funktionsweise ist in Abb. 3-5 dargestellt und wird nachfolgend erläutert.

In einem Bandtrockner wird das Rohmaterial mit einer konstanten Schütthöhe von wenigen Zentimetern mit Hilfe einer Verteilerschnecke auf ein luftdurchlässiges Gewebeband aufgetragen und eingebnet /161/. Die Schütthöhe (ca. 5 bis 8 cm) ist variabel einstellbar und kann somit auf die jeweiligen Erfordernisse angepasst werden. Das luftdurchlässige Band rotiert über einem Lochblech / Gitter, das je nach Herstellerphilosophie von unten oder oben mit Warmluft durchströmt wird. Als vorteilhaft bei der Luftdurchströmung des Spanteppichs von oben nach unten wird die Reduzierung der Staubteilchen in der Abluft gesehen, die vom Spanteppich selbst und dem Gewebeband gefiltert wird. Deshalb kann ein derartiger Bandtrockner in günstigen Fällen ohne eine zusätzliche Abluftreinigung betrieben werden. Dagegen findet bei der Luftdurchströmung der Spanmasse von unten nach oben gleichzeitig eine Materialauflockerung statt, weshalb die Warmluft besser verteilt und dadurch die Trocknung beschleunigt wird. Zur Erzielung eines besonders gleichmäßigen Trocknungsergebnisses wird der Spanteppich in der Mitte des Bandes von einer automatischen Wendevorrichtung (Rechen) durchmischt /13/, /162/. Aufgrund der relativ geringen Temperaturen in Bandtrocknern wird das Trockengut sehr schonend getrocknet und Geruchsprobleme können weitestgehend vermieden werden.

Durch einen im Trockner integrierten Wärmeübertrager wird Frischluft angesaugt und mit dem am Standort zur Verfügung stehenden Wärmemedium erwärmt /161/. Die warme Trocknungsluft wird durch die Wasserdampfaufnahme aus dem Rohmaterial gesättigt und kühlt sich dabei ab (konvektive Trocknung). Je nach Anlagengröße wird die dann feuchte Trocknungsluft über einen oder mehrere Ventilatoren abgesaugt /56/, /233/. Dabei kann der Abluftvolumenstrom genau dosiert und dadurch dem jeweiligen Trocknungsabschnitt optimal angepasst werden, um eine effektive Trocknung und die bestmögliche Ausnutzung der zugeführten Wärmeenergie zu erreichen. Im Aufgabebereich des Trockners (Nassbereich) ist deshalb sehr viel mehr Luft erforderlich als im Austragebereich /162/.



- | | |
|--------------------|---|
| 1 Rohmaterial | 6 Trocknungsband |
| 2 Aufgabeschnecke | 7 Absaugventilator |
| 3 Austrageschnecke | 8 Reinigungsbürste |
| 4 Trockenprodukt | 9 Energiezufuhr (Dampf, Heißwasser o. ä.) bzw. Prozessabluft (10) |
| 5 Bandwaschanlage | 11 (Außen-)Luft im Gegenstrom |

Abb. 3-5: Funktionsskizze und 3-D-Schnitt eines Bandtrockners /152/

Mit Hilfe von online überwachten Feuchtesensoren oder Infrarotmessgeräten erfolgt eine kontinuierliche Bestimmung des Wassergehalts des Rohmaterials, woraufhin die Geschwindigkeit des rotierenden Bandes gesteuert bzw. die Drehzahl der Absaugventilatoren angepasst wird (Abb. 3-5).

Bei einem hohen Wassergehalt des Spanmaterials sinkt die Bandgeschwindigkeit und damit die Durchsatzleistung des Trockners. Eine Alternative stellt die Temperaturanhebung der Trocknungsluft dar. Voraussetzung dafür ist jedoch die Möglichkeit einer Vorlauftemperaturanhebung

der Zuluftwärmeübertrager oder eine Volumenstromreduzierung der Ventilatoren; wobei letzteres mit einer Reduzierung des spezifischen Trockenspanoutputs verbunden ist. Trotz geeigneter Steuerungsmechanismen ist für ein gleichmäßiges Trocknungsergebnis der Spanmasse ein relativ homogenes Ausgangsmaterial wichtig (Holzart, -alter, Spangeometrie etc.) /161/, /162/, /242/.

Aufgrund von Energieeinsparmaßnahmen zur Steigerung der Prozesseffizienz wird insbesondere die Weiterentwicklung von Niedertemperaturtrocknern favorisiert. So werden z. B. bereits Vibrationsfließbettsysteme angeboten, bei denen das Trocknerband (ähnlich einem Bandtrockner) federnd gelagert und permanent in Vibrationen versetzt wird. Somit kann die Berührungsfläche des Trockenguts während der Luftdurchströmung erhöht und die Verweilzeit im Trockner verkürzt werden; gleichzeitig wird durch die Vibrationen der Transport der Späne im Trockner realisiert. Bei einem anderen System wird die Warmluft im Gegenstromprinzip zum Materialfluss geführt, wobei minimale Luft Eintrittstemperaturen ab 50°C ausreichen sollen, um zufrieden stellende Trocknungsergebnisse zu erzielen. Somit könnte sogar die Abwärme konventioneller Bandtrockner noch genutzt werden /13/.

Neben der etablierten Bandtrocknertechnologie können auch Heißdampftrockner (z. B. Exergietrockner oder Wirbelschichttrockner) zur indirekten Spantrocknung verwendet werden. Dabei wird die Trocknungskapazität des überhitzten Dampfes genutzt, um das Wasser aus dem Trockengut zu entfernen. Der Heißdampf wird in einem Wärmeübertrager erzeugt, der mittels Sattampf (8 bis 15 bar), Thermoöl oder Heißwasser betrieben werden kann. Beim Exergietrockner transportiert nun der überhitzte Dampf das zirkulierende Trocknungsgut bei etwa 2 bis 5 bar zum Trockneraustritt, wo es in einem Zyklon vom Dampf getrennt wird. Der abgezogene Dampf (bis zu 95 %) kann nun anderweitig genutzt werden. Heißdampftrockner stellen eine besonders schonende, geruchs- und staublose Trocknungsmethode dar, die jedoch aufgrund des druckbeaufschlagten Systems und der damit verbundenen hohen Investitionen nur bei sehr großen Trockenmengen eine Alternative darstellt. Gleichzeitig müssen für die rückgewonnenen Heißdampfmengen entsprechende Nutzungsmöglichkeiten bestehen (z. B. Fern- oder Prozesswärme), um einen wirtschaftlichen Betrieb zu gewährleisten /152/.

Nach dem Trocknungsprozess durchläuft das Spanmaterial häufig eine weitere Abscheider-einheit zur Ausschleusung von kleinsten metallischen Verunreinigungen (Kapitel 3.2.1.4). Die Notwendigkeit eines Metallabscheiders vor oder / und nach dem Trockner wird unter anderem von der Rohmaterialherkunft des Materials bestimmt /207/.

3.2.1.6 Lagern (trocken)

Das Trockenspan-silo dient als Vorratslager und der Entkopplung des Holzaufbereitungsprozesses von der Konditionierung. Zur Absicherung des kontinuierlichen Pelletproduktionsprozesses wird das Lager nur zu zwei Drittel gefüllt. Das verbleibende Silovolumens wird zum Ausgleich des aufbereiteten Rohmaterialstroms (Spanereinlagerung) genutzt, wenn beispielsweise im Falle eines unvorgesehenen Störfalls während der Pelletierung die Prozesskette der Rohstoffverarbeitung unterbrochen wird. Ebenso wird durch das Trockenspanlager über einen begrenzten Zeitraum der fortlaufende Betrieb der Pelletierung ermöglicht, trotz eines Anlagenstillstandes /-auszeit während der Rohstoffaufbereitung /242/, /260/.

Das Rohmaterial wird in einem Trockenspan-silo 10 bis 24 Stunden zwischengelagert, um etwaige Inhomogenitäten des Wassergehalts auszugleichen. Zur Beschleunigung dieses Prozesses ist in dem Silo ein Rührwerkzeug installiert, das die Spanmasse kontinuierlich durchmengt. Dies ist insbesondere bei der Verwendung von Hackschnitzeln als Ausgangsmaterial relevant, da diese meist dicker als Säge- oder Hobelspäne sind und selbst nach der Grobzerkleinerung noch eine vergleichsweise inhomogene Form aufweisen. Deshalb besitzen HHS häufig direkt nach dem Trockner im Holzinneren einen höheren Feuchtegehalt als am Rand /152/.

Werden in einem Unternehmen verschiedene Pelletqualitäten produziert, kann auch unterschiedlich aufbereitetes Spanmaterial zum Einsatz kommen (z. B. mit und ohne Rindenanteil, unter-

schiedliche Holzart etc., Kapitel 2.2). Um eine saubere / unvermischte Rohstoffzuführung zur Pelletpresse zu garantieren, werden die getrockneten Späne sortenrein gelagert – d. h. in separaten Silos. Anschließend werden entweder vollständig getrennte Verfahrenslinien vom Spanlager zur Pelletpresse aufgebaut oder die Presse(n) periodisch mit unterschiedlichem Rohmaterial aus dem entsprechenden Silo bestückt.

3.2.2 Konditionierung

Das Ziel der Rohstoffkonditionierung ist die Feinjustierung der Spanmasse, um die Homogenität der Spangeometrie zu verfeinern, die Geschmeidigkeit des Pressguts vor der Presse zu erhöhen sowie die Bindungskräfte im Rohmaterial zu aktivieren. Für den Pelletiererfolg sind deshalb neben dem Feinheits- und Vermahlungsgrad besonders der Wassergehalt des Pressmaterials, dessen Temperatur sowie die Beifügung von Additiven wie Wasser oder anderen Bindemitteln von Bedeutung (Kapitel 2.3.2). Derartige Konditionierungsmaßnahmen können Leistungssteigerungen der Pelletpresse von bis zu 75 % bewirken und verringern den Energieverbrauch beim Pelletieren z. T. erheblich /103/.

3.2.2.1 Feinzerkleinerung (Trockenvermahlung)

Ziel der Feinzerkleinerung ist es, eine möglichst gleichmäßige Korngrößenverteilung mit einer definierten Stückigkeit des Rohstoffs zu erhalten und gleichzeitig die spezifische Oberfläche der Späne zu erhöhen. Dadurch kann das im Holz enthaltene natürliche Bindemittel Lignin während der Pelletierung besser aktiviert werden. Dies hat zur Folge, dass sich die natürlichen Bindungseigenschaften des Holzes beim Pelletieren verbessern. Außerdem kann der Pelletierdurchsatz gesteigert werden, da die Spanmasse vor ihrem Eintritt in die Matrizenkanäle der Pelletpresse durch deren rotierende Presswerkzeuge (Koller) nicht noch weiter vermahlen werden muss (Kapitel 3.2.3).

Zur Feinzerkleinerung von Spänen holzartiger Biomasse haben sich Hammermühlen als besonders geeignet herausgestellt (Kapitel 3.2.1.3). Für die meisten Anwendungsfälle ist eine ausreichende Zerkleinerung dann erreicht, wenn die Korngröße etwa 1 bis 2 mm kleiner als der zukünftige Pelletdurchmesser ist. Bei einem Pelletdurchmesser von 6 mm liegt die geeignete Spangröße somit bei 4 bis 5 mm (+/- 1 mm) /56/, /139/. Ist eine Verwendung der Pellets in Kohlekraftwerken zur Mono- oder Mitverbrennung vorgesehen, wird auf eine möglichst hohe Ausgangszerkleinerung¹³ der Spanmasse Wert gelegt, um den Wiederaufmahlaufwand der Brennstoffmühlen zu reduzieren /103/, /226/.

Nach der Feinzerkleinerung der Spanmasse werden Partikel mit Übergößen durch ein Sieb aussortiert und erneut der Mühle zugeführt. Der Wassergehalt der Spanmasse sinkt während des Prozesses um etwa 1 bis 1,5 %, da durch die hohen Reibungs- und Scherkräfte in der Mühle Wärme freigesetzt wird /178/.

3.2.2.2 Mischen

Im Mischer (oder Konditionierer) können separat aufbereitete Spanqualitäten – in getrennten Rohstofflinien – gemischt werden, da diese teilweise deutlich voneinander abweichenden Holzeigenschaften besitzen (z. B. Rinde / SNP oder Hart-/ Weichholz). Andererseits bietet die Konditionierung die Möglichkeit Additive dem Spanmaterial beizumischen, wobei es sich sowohl um Zuschlagstoffe¹⁴ als auch um Bindemittel handeln kann.

¹³ Möglichst kleine Partikel vor der Pelletierung begünstigen die Rückvermahlung der Pellets vor der Einblasung in Staubfeuerungen, in denen der Brennstoff eine maximale Korngröße der Einzelpartikel von 2 mm aufweisen darf /226/.

¹⁴ Zuschlagstoffe können neben Bindemitteln als Additive im Pelletierprozess eingesetzt werden. Ihre wesentliche Funktion besteht jedoch nicht in der Optimierung der Bindungseigenschaften, der Festigkeit oder des Abriebverhaltens der Pellets sondern in der Adaptierung anderer brennstofftechnischer Eigenschaften. Diese Funktion kann, z. B. in der Anhebung der Ascheschmelztemperatur, der Aktivierung von Bindemitteln oder in der Bindung von Feinstpartikeln (Feinstaubreduktion) bestehen.

Wasser stellt aufgrund seiner vielfältigen Funktionen im Pelletierprozess sowohl das einfachste Bindemittel- als auch den kostengünstigsten Zuschlagstoff dar. Wasser weicht die Spanmasse auf, um Partikelbindungen (Verflechtungen) zu erleichtern und umhüllt die Partikeloberfläche mit einem Feuchtigkeitsfilm, der Unebenheiten ausgleicht und die Haftmechanismen während des Verdichtungsvorganges in der Presse verbessert. Wasser kann in zwei Aggregatzuständen dem Material beigemischt werden: als Wasser oder als Dampf (vgl. Kapitel 2.3).

Die Wasser- bzw. Heißdampfzumischung zur Spanmasse erfolgt über Sprüh- bzw. Dampfdüsen im Konditionierer. Mit Hilfe von Temperatur- und Feuchtigkeitssensoren kann die Dosierung geregelt werden, um eine optimalen Konsistenz des Materials vor der Presse zu erreichen /2/, /103/, /152/. Sollte der Sollwert des Wassergehalts während der Konditionierung überschritten werden, muss die technische Trocknung des Rohmaterials verstärkt werden. Je nach eingesetzter Presse, dem verwendeten Rohmaterial und den angestrebten Produkteigenschaften liegt der optimale Spanwassergehalt¹⁵ vor der Pelletierung zwischen 8 bis 12 % /151/. Wird zur Konditionierung Dampf verwendet¹⁶, wird die Spanmasse auf Temperaturen bis etwa 50°C erwärmt ohne eine wesentliche Veränderung des Wassergehalts zu erfahren. Bei der energieintensiven Dampfkonditionierung steht häufig die Aktivierung des holzeigenen Bindemittels Lignin bzw. bestimmter zugesetzter Presshilfsmittel (PHM) im Vordergrund, um die Bindefähigkeit des Pressguts und die „Geschmeidigkeit“ des Materials während der Pelletierung zu verbessern /259/.

In Deutschland werden neben Wasser fast ausschließlich stärkehaltige Bindemittel zur Holzpelletierung verwendet (Kapitel 2.3.2.1). Die Zugabe der PHM erfolgt im Pelletwerk meist direkt im Konditionierer, vor dem Durchmischungsprozess des Pressguts, manchmal aber auch bereits während der Feinzerkleinerung der Spanmasse in der Mühle, um die Vermischung des Pressguts zu verbessern. Damit die pulverförmigen Stärken ihre Bindungseigenschaften im Pressgut entfalten können, ist ein bestimmter Wassergehalt der Spanmasse notwendig. Deshalb muss während der Konditionierung die Dosierung des PHM und des Wassergehalts des Spanmaterials genau aufeinander abgestimmt werden. Die Neigung zur Verkleisterung (Viskositätsverhalten) jeder Stärke variiert und kann beeinflusst werden von der Temperatur im Konditionierer, dem Feuchtegehalt des Pressguts und der Dauer des Konditionierungsvorganges, d. h. der Reifezeit. Stärkehaltige PHM werden vor der Wasser-/Dampfzugabe mit Hilfe von automatischen Dosiereinrichtungen der Spanmasse beim Eintritt in den Konditionier zugemischt. Teilweise erfolgt die Zugabe bereits während der Feinzerkleinerung des Holzes, um die Durchmischung des Materials zu verbessern und die Reifezeit im Konditionierer zu verkürzen. PHM können dem fertigen Pellet – zusammen mit dem holzeigenen Lignin – neben der nötigen Festigkeit auch ein glänzendes Äußeres und eine gewisse Feuchtigkeitsresistenz verleihen. Aus ökonomischen Gründen wird der Einsatz von PHM immer auf ein Minimum begrenzt bleiben, da PHM auf Basis naturbelassener Rohstoffe in der Regel teurer sind als das Holzrohmaterial /2/, /143/.

3.2.2.3 Reifen

Für einen möglichst homogenen Temperatur- und Feuchtigkeitsgehalt verbleiben die angemischten Rohmaterialien (Spanmasse, Wasser, PHM) über eine Verweilzeit von etwa 15 bis 20 min im Konditionierer. Während dessen durchmischen Rührwerkzeugen kontinuierlich die Masse /2/. Durch eine weitere Ausdehnung der Reifezeit kann der spezifische Energieverbrauch zur Pelletierung um bis zu 15 % gesenkt werden /181/. Sollte die Größe des Konditionierers nicht ausreichen die notwendige Verweilzeit des Pressguts zu gewährleisten (z. B. wenn ein Konditionierer das Pressgut für mehrere Pressen vorbereitet), wird das Material zum „Nachreifen“ in separate Zwischenbehälter in unmittelbarer Nähe der Pelletpressen transportiert. Diese so genannten Reifebunker sind zur Temperaturhaltung isoliert und ebenfalls mit Rührwerkzeugen ausgestattet, um

¹⁵ Der Spanwassergehalt wird in der Praxis häufig als „Spanfeuchte“ bezeichnet, beschreibt jedoch die physikalische Größe des Wassergehalts.

¹⁶ Alternativ können zur Temperaturerhöhung des Pressguts beheizte Förderschnecken genutzt werden /89/.

eine optimale Durchmischung des Spanmaterials sowie der eventuell zugesetzten Additive zu garantieren und dadurch die Quellwirkung der stärkehaltigen PHM zu unterstützen /152/.

3.2.3 Pelletierung

Im Anschluss an die Konditionierung wird das aufbereitete Spanmaterial während der Pelletierung zu Holzpellets verpresst.

3.2.3.1 Pressen

Holzpellets werden meist in zylindrischen Formen mit einem Durchmesser zwischen 6 bis 8 mm Durchmesser verwendet. Zu deren Herstellung haben sich Kollergangpressen mit Ring- oder Flachmatrizen durchgesetzt, deren Anlagenkapazität derzeit zwischen 1,5 bis 7 t/h liegt. Mit dem aktuellen Anstieg der durchschnittlichen Produktionskapazitäten pro Pelletwerk wird mittelfristig auch die Anlagenkapazität der Pressen weiter steigen (10 bis 20 t/h).

Beim Pelletiervorgang muss der Druck der Pelletpresse den Haftreibungswiderstand des Pressguts überwinden. Der spezifische Energieverbrauch einer Holzpelletpresse liegt etwa zwischen 1,3 bis 2,7 % bezogen auf den Energiegehalt der Pellets /56/, /81/, /103/.

Bei dem Kollergangpressverfahren sind 2 bis 5 Walzen ("Koller") an einer bzw. an mehreren gekreuzten Achsen angebracht, welche in ihrer Mitte eine gemeinsame vertikale (bei Flachmatrizenpressen) oder horizontale (bei Ringmatrizenpressen) Drehachse besitzen. Für die Festigkeit der Pellets sind neben den Einsatzstoffen vor allem die Presskanalform, dessen Oberflächenrauigkeit und die Fließgeschwindigkeit des Pressguts (Homogenität der Partikel / Korngröße, Geschmeidigkeit des Materials) verantwortlich /87/.

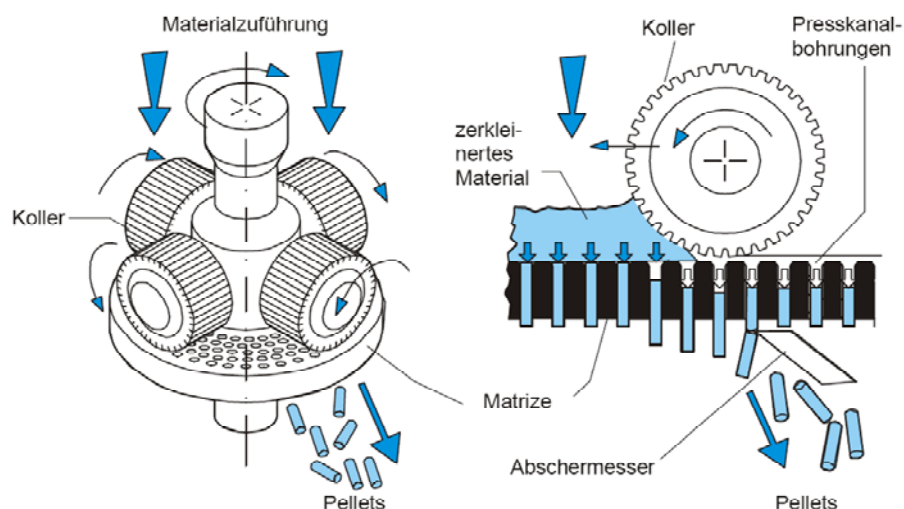


Abb. 3-6: Arbeitsprinzip einer Pelletpresse mit Flachmatrize /103/

- **Flachmatrizenpresse.** Bei der Flachmatrizenpresse überfahren die zylindrisch oder konisch gestalteten Koller mit ihrer profilierten Lauffläche berührungslos die scheibenförmige Matrize mit den Presskanalbohrungen (Abb. 3-7). Die einzelnen Koller rotieren um die eigene Achse; sie werden meist passiv durch Reibung mit der Matrize bzw. deren Pressgutaufgabe angetrieben. Dabei treten Schneid- und Scherkräfte relativ zur Matrize auf, die das Spanmaterial weiter zerkleinern / zerfasern und dabei entlüften. Das Feinmaterial wird unter dem in der Schüttgutaufgabe aufgebauten Druck von oben nach unten Schicht für Schicht in die Bohrungen der Matrize hineingepresst und dort verdichtet. Der möglichst konstante Abstand der Koller von der Matrizenlauffläche ("Rollenspaltabstand") ist abhängig vom Pressgut und den vorherrschenden Betriebsbedingungen. Aus der Matrizenunterseite tritt ein Pressgutstrang aus, der entweder allein abbricht oder von Abschermessern auf die gewünschte Länge gekürzt wird /56/, /87/, /103/, /119/, /185/.

- **Ringmatrizenpresse.** Die Ringmatrizenpresse unterscheidet sich im Wesentlichen nur in ihrer geometrischen Form der Matrize und der Antriebsart von der Flachmatrizenpresse. Hier verharren die Kollerachsen in starrer Position, während stattdessen die ringförmige Matrize motorisch angetrieben wird (Abb. 3-7). Dadurch kommt es zu einem Verpressen des Materials von innen nach außen durch die rotierende Matrize; ein sehr gleichmäßiger Verschleiß ist die Folge. Das Ringmatrizenprinzip wird weltweit in der industriellen Holzpellettherstellung am häufigsten eingesetzt und ist insbesondere beim Einsatz von Weichholz die favorisierte Technik /103/, /152/.

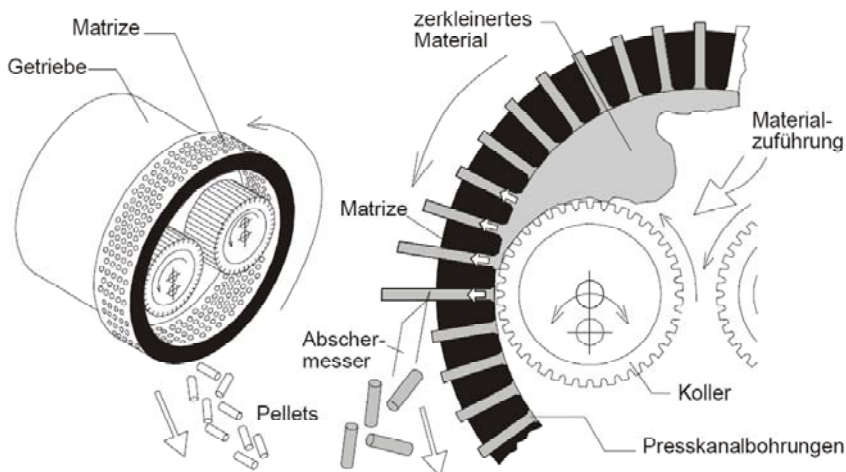


Abb. 3-7: Arbeitsprinzip einer Pelletpresse mit Ringmatrize /139/

Neben der Wahl der Lochmatrize stellt die Antriebsleistung der Presse eine wichtige Kenngröße dar, die sowohl die Korngröße des zu verpressenden Materials als auch die Brennstofffestigkeit beeinflussen kann. Haben die Spanpartikel des aufbereiteten Pressguts nach der Konditionierung nicht den optimalen Feinheitsgrad zur Pelletierung, erfolgt die Nachzerkleinerung unter hohem Druck in der Presse durch die Zermahlung des Materials zwischen den Kollerwalzen und der Matrize /103/, /185/.

Die Größe der Matrize (Durchmesser, Breite, Tiefe), deren offene Fläche sowie die geometrische Anordnung und Ausgestaltung der Bohrungen (den Presskanälen) stellen weitere Leistungsfaktoren dar. Als Anhaltswert für die Motorleistung gilt eine spezifische Lochbahnfläche (freier Querschnitt) von etwa $30 \text{ cm}^2/\text{kW}$ Antriebsleistung /103/, /226/, /231/.

Der Pelletdurchmesser wird von den Bohrlochquerschnitten bestimmt. Ziel ist es, so viel Lochfläche wie möglich auf der Matrizenoberfläche anzuordnen, um den spezifischen Materialdurchsatz zu maximieren. Dabei wirkt die Materialfestigkeit der Matrize als begrenzender Faktor. Hinzu kommt, dass die Presskanalöffnung im Eingangsbereich (Schluck) meist einen etwas größeren Durchmesser hat, um den Einzug des Materials zu erleichtern, der dann konisch auf den eigentlichen Presskanalquerschnitt reduziert wird (Abb. 3-8). Der Presskanal endet im Auslauf meist wieder mit einer Aufweitung, die konisch oder stufenförmig ausgeführt sein kann. Bei einer konstanten Antriebsleistung steigt bei Matrizen mit größeren Bohrlochdurchmessern die Durchsatzleistung der Presse /103/, /119/. Dies gilt auch bei geringeren Kanal-längen oder bei einem kleineren Verhältnis aus Bohrlochdurchmesser und -länge.

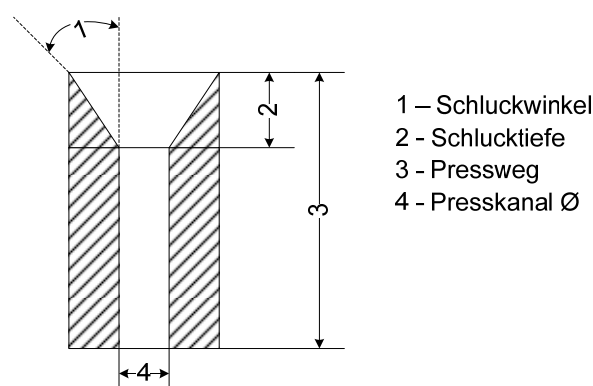


Abb. 3-8: Technische Kenngrößen eines Presskanals einer Holzpelletmatrize, nach /114/

Bei der Pelletierung holzartiger Rohstoffe liegt das Pressverhältnis (Bohrlochdurchschnitt / Kanallänge) heute üblicher Weise zwischen 1:3 bis 1:5 /152/. Die Variation des Pressverhältnisses muss somit genau auf das einzusetzende Rohmaterial abgestimmt sein, da ansonsten die angestrebten Leistungssteigerungen schnell mit Einbußen bei der Pelletqualität verbunden sind. Weiterhin soll ein Brennstoff mit möglichst konstanten geometrische Abmessungen über das gesamte Pressgut erzielt und Überlängen sowie Bruchpellets minimiert werden, um Probleme beim Pellettransport bzw. beim Beschicken der Feuerungsanlage (Brückenbildung in Lagern, hohe Feinanteile im Schüttgut, Schwankungen der Brennstofffördermenge) oder dem gleichmäßigen Abbrand der Pellets zu vermeiden. Die Länge der Pellets wird von der Länge des zylindrischen Presskanals, dem Pressdruck und der Art des Rohmaterials sowie der Konsistenz des Pressguts beeinflusst. Bei einer präzisen Abstimmung der Pressguteigenschaften auf die technischen Parameter der Presse kann die Durchsatzleistung optimiert, die Bruchneigung des Pressgutstrangs synchronisiert und so gezielt die Pelletlängenverteilung gelenkt werden. Ist die Vortemperierung des Pressguts im Konditionierer nicht möglich oder unzureichend, kann auch eine Temperatursteuerung der Presse zur Durchsatzoptimierung beitragen /85/, /114/, /119/. Um die Produktion von Pellets mit Überlängen zu minimieren, sorgen zusätzlich Abschermesser an der Außenseite der Matrize für eine Längenbegrenzung des Pressgutstranges.

Während der Pelletierung werden durch die Druck- und Reibungskräfte in der Presse üblicher Weise Temperaturen zwischen 90 bis 130°C erreicht, wobei die höchsten Oberflächentemperaturen in den Presskanälen auftreten. Deshalb ist eine technische Kühlung der Bauelemente mit Wasser, Öl oder Luft notwendig, um eine verfrühte Materialermüdung zu vermeiden /103/, /178/, /225/. Zusätzlich belasten Ablagerungen feiner Spanpartikel / Stäube die rotierenden Teile und Lager der Presse ebenso wie der Materialdurchsatz durch die Presse, der darin zu Abschleifungen und Beschädigungen führen kann, die die regelmäßigen Austauschintervalle der z. T. wieder aufarbeitbaren Koller und Matrizen beschleunigen /93/, /177/.

Trotz der hohen Materialbeanspruchung unterstützt ein moderater Temperaturanstieg in der Presse auch die Brückenbindung zwischen den Rohmaterialteilchen. Bestimmte PHM benötigen beispielsweise sehr hohe Temperaturen um ihre volle Quell- und Klebkraft zu aktivieren (Kapitel 2.3.2). Auch das im Holz enthaltene Lignin verflüssigt sich erst bei ausreichender Wärme einwirkung und kann dann seine volle Bindungskraft entfalten. Bei zu hohen Temperaturen im Presskanal – ca. 150°C und mehr – kann jedoch der thermo-chemische Zersetzungsprozess des Lignins einsetzen (Kapitel 2.2.2.1); anhand einer dunklen Verfärbung der Pelletmanteloberfläche wird dies sichtbar ist. Daneben wirken sich hohe Temperaturen in der Presse auch auf den Wassergehalt des Pressguts aus, der während der Pelletierung um bis zu 2 % sinkt /178/.

3.2.3.2 Kühlen

Nach der Pressung müssen die noch warmen Rohpellets formgefestigt werden, um das verflüssigte Lignin bzw. eventuell zugesetzte zusätzliche Bindemittel auszuhärten. Dafür werden die Pellet auf Lagertemperatur abgekühlt. Zur technischen Kühlung werden meist Gegenstromkühler eingesetzt, aber auch Vertikal- und Fließbettkühler sind nutzbar. Als Kühlmittel wird fast immer Um- oder Außenluft genutzt, die die Pellets durchströmt. Dabei wird die Wärmeenergie der Presslinge auf den Abluftstrom übertragen, der abgezogen wird.

Zur optimalen Trocknungsgeschwindigkeit sind unterschiedliche Erfahrungen bekannt. Während die einen die schonende Abkühlung der Pellets bevorzugen, favorisieren andere hohe Trocknungsgeschwindigkeiten für besonders beständige Bindungen /91/, /96/, /132/, /140/, /207/. Tatsache ist, dass es bei hohen Presstemperaturen (um 100°C) zur Verdampfung des Restwassergehalts im Pelletinneren kommen kann. Nach dem Pelletaustritt aus der Presse und der damit einhergehenden Druckentlastung kann der Wasserdampf fast explosionsartig expandieren und so den Pressling schwächen oder gar zerstören. Somit ist es das Ziel der schnellen technischen Kühlung, die Presslinge direkt nach der Phase der Heißverdichtung abzukühlen und dabei die im Pelletinneren verbliebene Dampfmenge zu kondensieren. Spannungsrisse und Blasenbildung an

der Pelletoberfläche können so vermieden werden /251/. Bei Presstemperaturen deutlich unter 100°C besteht diese Gefahr weniger. Eine schonende Kühlung weist unter diesen Bedingungen nicht nur aus Gründen der Energieeffizienz sondern auch in Hinblick auf die mechanische Beanspruchung der Pellets (durch Verwirbelungen im Kühler) Vorteile auf.

3.2.3.3 Sieben

Nach dem Austritt der gehärteten Pellets aus dem Kühler folgt schließlich eine Reinigungsstufe, bei der Bruchstücke (die z. B. beim Brechen der „Endlospellets“ am Matrizenaustritt entstanden sind), Abrieb und Staub abgesiebt werden. Dazu werden meist vibrierende Rotationssiebe mit einer definierten Sieblochgröße (Standard 3,15 mm /39/) verwendet /152/. Nach der Absiebung sollte der verbleibende Feinanteil im Schüttgut maximal 1 % betragen (Anhang, Tabelle A-3).

Der abgesiebte Feinanteil wird zusammen mit dem Filtermaterial des Saug-/Zuggebläses der Pelletproduktions- und -förderanlage wieder in den Herstellungsprozess eingebracht und durchläuft diesen ab der Feinzerkleinerung des Rohmaterials erneut.

3.2.4 Verladung

Die losen Pellets werden entweder direkt nach der Absiebung in die Brennstoffsilos vor Ort transportiert oder über automatische Abfüllanlagen in feuchtebeständige Plastiksäcke zu je 10, 15 oder 20 kg verpackt oder in BigBags (Gewebesacksilo) zu 500 bis 1 000 kg verfüllt. Die verfüllte Sackware wird anschließend meist auf Paletten gelagert und für den Transport zusätzlich gesichert, um das Verrutschen der Ladung zu verhindern und die mechanische Beanspruchung der Pellets zu begrenzen. Eine erneute Absiebung des Feinanteils von Pelletsackware vor der Endkundenauslieferung findet in der Regel nicht statt.

In Deutschland gelangt der überwiegende Anteil der Pelletproduktion als lose Ware in den Handel. Um saisonale und konjunkturelle Schwankungen abzufedern, werden die Pellets in Schüttgutsilos (ca. 2 000 m³ oder mehr) im bzw. am Pelletwerk gelagert. Je nach Vertriebs- und Logistikkonzept¹⁷ wird näherungsweise eine Lagerkapazität von mindestens 1 bis 2 monatlichen Produktionsmengen vorgehalten /178/, /250/. Mit der Zunahme der Produktionskapazitäten je Standort ist ein Trend zu externen Zwischenlagern zu beobachten, wobei auch Lagerkapazitäten von Brennstoffhändlern, Baumärkten etc. in Anspruch genommen werden.

Die Verladung der losen Siloware zum weiteren Transport erfolgt über eine automatische Abfülleinrichtung, die erneut mit einer Absiebanlage ausgestattet ist und je nach Bedarf eingesetzt wird. Da Pellets als Schüttgut transportiert und gehandelt werden, wird als Kenngröße zur Auswahl von Transportfahrzeugen, Containern, Lagerflächen, Bunkervolumen u. ä. die Schüttdichte herangezogen. Sie stellt ein Raummaß für die Masse eines Brennstoffs pro Lager- oder Transporteinheit dar und wird von mehreren Parametern beeinflusst, wie der Rohdichte und der Stückigkeit des Brennstoffs (Dimension, Form, Oberflächenbeschaffenheit, Tabelle 2-3). Die abgefüllte Schüttgutmenge wird durch Wiegung ermittelt.

3.3 Distribution

Die Distribution umschreibt den Lieferprozess der Holzpellets vom Produktionsstandort bis ins Brennstofflager beim Endkunden einschließlich aller Transport-, Umschlag- und Lagervorgänge.

3.3.1 Pellettransport und Lagerung

Mit zunehmender Entfernung des Kunden vom Pelletwerk erfolgt die Auslieferung der Ware über ein Vertriebsnetzwerk mit ein oder mehreren Zwischenlagern und unter Einbeziehung mehrerer Handelsunternehmen und Umschlagplätze. Dabei unterliegen die Pellets je nach Transportmittel, Umschlaghäufigkeit und -technik mechanischen und z. T. auch witterungsbedingten

¹⁷ z. B. Intervalle der Rohmaterialanlieferung und des Brennstoffabsatzes, fester Kundenkreis / Vertragspartner, Entfernung zum Absatzmarkt etc.

Beanspruchungen. Während der Eintrag von Feuchtigkeit in das Schüttgut (z. B. durch Regen, Nebel oder Schnee) durch geeignete Transportfahrzeuge, Umschlagplätze und Lagermöglichkeiten ausgeschlossen werden kann, müssen mechanische Beanspruchungen während des Distributionsprozesses einkalkuliert werden. Diese sind am deutlichsten sichtbar durch die Erhöhung des Feinanteils und des Pelletbruchs im Schüttgut. Richtwerte zur Abschätzung des Feingutanfalls entsprechend der eingesetzten Transporttechnologie können Tabelle 3-1 entnommen werden. Um die mechanische Belastung der Pellets und den Zeitaufwand möglichst gering zu halten, werden für den Brennstofftransport in Zwischenlager eher LKW mit Schubbodenentladevorrichtung als Silopumpwagen genutzt, bei längeren Strecken werden auch Bahnwagons oder Schiffe einbezogen. Besonders schonend erfolgt die Pelletbe- und -entladung von Transportfahrzeugen und Lagern über Förderbändern.

Tabelle 3-1: Richtwerte zur überschlägigen Kalkulation des Feingutanfalls loser Pelletware entsprechend der eingesetzten Logistik- bzw. Transporttechnologie, in Anlehnung an /2/

Transportfahrzeug bzw. Umschlagvorgänge	typische Transportentfernung bis	Erhöhung des Feingutanfalls von – bis ^{a)}
Silopumpwagen mit Staubabsaugung	75 km	0,3 – 0,5 %
LKW mit pneumatischer Entladerampe	100 km	0,5 – 0,8 %
LKW ohne automatische Entladerampe	100 km	0,3 – 0,5 %
Schüttgutbahnwagons inkl. Be- und Entladung	400 km	0,5 – 1,0 %
Binnenschifftransport inkl. Be- und Entladung		1,5 – 2,5 %
Hochseeschifftransport inkl. Be- und Entladung		1,5 – 3,5 %
Umschlagprozesse je 1 t Holzpellets:		
Automatische Abfüllung von LKW aus Hochsilolager		0,3 – 0,5 %
Umschlag Freifläche/Lager auf LKW		1,5 – 3,5 %
Umschlag von LKW auf Bahn		0,5 – 1,5 %
Umschlag von LKW auf Binnenschiff mit Zwischenlagerung		1,5 – 3,5 %
Umschlag von LKW auf Hochseeschiff mit Zwischenlagerung		1,5 – 3,5 %
Umschlag von Bahn auf Hochseeschiff		1,5 – 3,5 %

^{a)} Spannbreiten in Abhängigkeit von der vor Ort angewandten Umschlagtechnik

Um den zulässigen Feinanteil der Pelletware vor der Auslieferung an den Endkunden bzw. vor der Abfüllung in BigBags / Sackware nicht zu überschreiten, werden die Pellets vor jedem Weitertransport oder spätestens vor der letzten Abfüllung zur Auslieferung an den Endkunden abgesiebt /11/, /188/. Der abgesiebte Feinanteil wird entweder zurück zum Pelletwerk transportiert und dort erneut in den Produktionsprozess eingebracht, in nahe gelegenen Staubfeuerungsanlagen eingesetzt oder einer anderweitigen stofflichen bzw. energetischen Nutzung überführt /2/.

Die Austragung der Pellets aus einem Silopumpfahrzeug in das Endkundenlager erfolgt pneumatisch über einen Schlauch, der an einem Öffnungsstutzen an das Lager angedockt werden kann. Zur Reduzierung der Aufwirbelung vom Holzstaub (ebenfalls Teil des Feinanteils) im Endkundenlager erfolgt während des Einblasvorgangs der Pellets eine parallele Staubabsaugung über einen zweiten Lageröffnungsstutzen /40/, /41/, /77/. Das in Kapitel 2.3.2.2 beschriebene Pellet-Coating während des Brennstoffauslieferungsvorgangs mit Pumpfahrzeugen soll die Abriebfestigkeit der Pellets zu erhöhen und die Staubemissionen während des Ausblasprozesses reduzieren. Weniger üblich ist in Deutschland das Abkippen der Holzpellets aus einem LKW mit Entladerampe in einen (ebenerdigen) Pelletbunker.

Sackware oder BigBags werden von Pellethändlern meist auf Paletten per LKW angeliefert und mit Hilfe eines Hubwagens in die Lagerräume des Endkunden transportiert. Die Direktabholung von Pelletsackware in Baumärkten oder bei Brennstoffhändlern ist auch möglich.

Die Pelletlagerung beim Endkunden kann sowohl außerhalb des Hauses in Erd- oder Freiluftbehältern als auch im Haus in Kellerräumen, Kunststofftanks, Gewebesilos oder in anderen vor Feuchte und Frost geschützten Lagern erfolgen. Ebenso vielfältig wie die Lagermöglichkeiten sind die Austragungssysteme für Pellets aus dem Lager (Abb. 3-9). Schrägböden mit Trichterauslauf und Raumaustrageschnecken, Schubbodenlager, Erdtanks mit Saugsysteme stellen nur einige der zahlreich vorhandenen Systeme dar /51/, /77/, /92/, /152/.

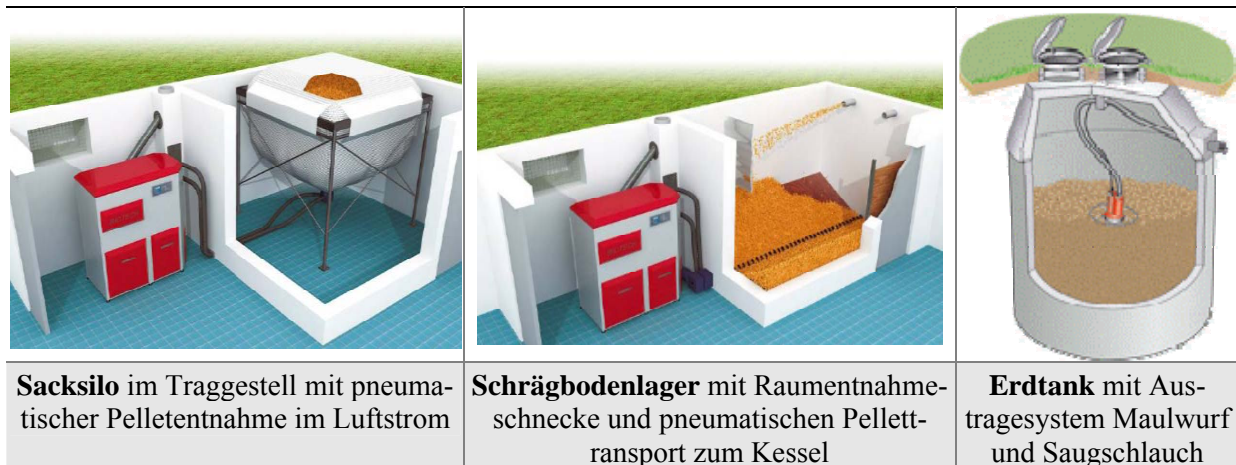


Abb. 3-9: Möglichkeiten der Lagerraumgestaltung einschließlich der Pelletaustragung /22/, /137/

Die konstruktive Gestaltung und fachgerechte Installation des Pelletfördersystems vom Brennstofflager zur Kesselanlage (sowie aus dem Kesselvorratsbehälter in den Brennraum, Kapitel 3.4.1) hat ebenfalls einen wesentlichen Einfluss auf die Stückigkeit und den Feinanteil der in der Brennkammer ankommenden Pellets. Je nach Brennstofffestigkeit und dem vorhandenen Fördersystem kann der Transport der Pellets zu hohen mechanischen Belastungen führen (z. B. mehrfache Brennstoffübergaben von einem Fördersystem zu einem Anderen, ungünstige Strömungsabbrüche bei „scharfen“ Bögen bei Saugsystemen oder engen Windungsabständen bzw. Durchmessern bei Stokerschnecken), in deren Folge die Pellets gebrochen oder zerrieben werden. Dadurch erhöhen sich die Stückigkeit des Brennstoffs und dessen Feinanteil. In ungünstigen Fällen kann die Ansammlung des Feinanteils in einer Förderstrecke den Brennstofftransport blockieren und damit zu einer verminderten Förderate bis hin zum Ausfall der gesamten Feuerungsanlage führen. In günstigen Fällen werden Pellets mit Überlängen gebrochen und somit die Brennstoffeigenschaften weiter homogenisiert /2/, /157/, /158/, /259/.

Neben der Erhöhung des Feinanteils und der Stückigkeit der Pellets besteht bei jedem Transport-, Umschlag- oder Lagerprozess die Gefahr des Fremdkörpereintrages in das Schüttgut. Dabei kann es sich um Schmutz, kleine Steine, Metalle oder Sand, Insekten, Pilzsporen, Abschleifungen oder Verschleißteile von Förder- und Lagereinrichtungen u. ä. handeln. Gelangen Fremdstoffe/-partikel mit dem Brennstoff in sensible Förderstrecken (z. B. Schläuche) oder in die Brennkammer kann dies zu erheblichen Schäden an der Technik führen oder den Abbrandprozess beeinflussen.

3.3.2 Risiken

Neben dem Risiko von Qualitätsverlusten des Brennstoffs beim Transport und der Lagerung muss dem Risiko von Umwelt- und Gesundheitsschäden entgegengewirkt werden. Die Gefahr besteht sowohl für die Brennstofflagerung in Hallen, Silos oder in geschlossenen Räumen bei Endkunden als auch beim Transport der Pellets (Kapitel 3.3) in Containern, Wagons oder Schiffen. Folgende Risiken gilt es zu beachten /60/, /81/, /144/, /179/, /193/, /241/:

- Substanzverlust durch biologische Abbauprozesse ⇒ Verlustrisiko
- Pilzwachstum und Sporenbildung ⇒ Gesundheitsrisiko

- Selbsterwärmung/-entzündung ⇒ Brandrisiko
- Ausgasung von Kohlenstoffmonoxid (CO), Terpen und Hexanal ⇒ Umwelt- und Gesundheitsrisiko (Vergiftung)
- Wiederbefeuchtung ⇒ Qualitätsrisiko, das auch die zuvor genannten Risiken begünstigt
- Ablagerung von Holzfeinmaterial und –stäuben an technischen Leitungen durch Umschlag und Transportvorgänge (Tabelle 3-1) ⇒ Risiko von Staubexplosionen

Generell gelten für häusliche Pelletlager ähnliche Risiken, wie für Lagerstätten von Produzenten und Großhändlern (Kapitel 3.2.4 und 3.3.1). Während die Großpelletlager jedoch in der Regel mit Temperatur- und CO-Meldern ausgestattet sind, um Selbsterwärmungsprozesse, Schwelbrände und Feuer möglichst schnell lokalisieren zu können, ist dies in Endverbraucherlagern bisher nicht üblich. In der Vergangenheit ist es jedoch bereits vereinzelt zu tödlichen Unfällen in Folge von Atemluftvergiftungen gekommen, da Personen die Gefahr von Ausgasungen bei Holzpellets nicht kannten oder unterschätzten. Dabei besteht in den ersten 3 Monaten nach der Pelletierung von Frischholz die größte Gefahr der Ausgasung von giftigen flüchtigen Bestandteilen (CO, Terpen und Hexanal). Der höchste Terpengehalt kann direkt nach der Produktion der Pellets gemessen werden, während die Ausgasung der Hexanale ihr Optimum mit etwas Verzögerung nach dem ersten Lagermonat erreicht /70/. Nach ersten Untersuchungen wird die Freisetzung der Gase – unabhängig von der gelagerten Pelletmenge – von folgenden Faktoren bestimmt /23/, /30/, /70/, /180/, /193/, /240/:

- Holzart des Pelletrohmaterials (Gehalt an ungesättigten Fettsäuren)
- „Alter“ des Rohmaterials und der Pellets (Zeitraum nach dem Herstellungsprozess)
- Trocknungsprozess (Temperaturniveau, Kapitel 3.2.1)
- Außen- und Lagerraumtemperatur
- Feuchtigkeit des Brennstoffs

Die Gefahr einer gesundheitsgefährdenden Gaskonzentration ist umso größer, je voller der Brennstofflagerraum ist, da das verbleibende Luftvolumen sich – bei einem unzureichenden Luftwechsel – schneller mit den ausgegasteten Stoffen anreichern kann. Zukünftig soll es mit Hilfe von speziellen Befüllstutzen mit integrierter Belüftungsfunktion möglich sein, einen natürlichen Luftaustausch auf Basis der unterschiedlicher Temperatur- und Druckverhältnisse zwischen Lagerraum und Umgebungsluft, zu realisieren. Zusätzlich sollen Warnhinweise u. a. an Lagerraumtüren über die Risiken informieren. In Dänemark und Schweden existieren bereits Grenzwerte für maximal zulässige Terpen- und CO-Gehalte in Pelletlagerräumen /30/, /144/.

Tendenziell besteht in großen Lagerräumen/-silos ein höheres Brandrisiko. Je größer das Lager volumen, desto höher ist die Gefahr der Selbstentzündung des Brennstoffs, da das Verhältnis von Oberfläche und Volumen (Selbsterwärmung der Pellets zu Wärmeableitung an Lager raum / Wandung) sinkt und somit die Temperaturen im Lager bei einem einsetzenden Schwelbrand schneller ansteigen und zur Entzündung der Pellets führen können. Die Selbstentzündungstemperatur ist von der Pelletqualität abhängig und wird von den gleichen Faktoren wie die Ausgasung beeinflusst. Selbstentzündungsreaktionen treten deshalb auch häufiger unmittelbar nach der Pelletproduktion auf als bei länger gelagerten Pellets. Begünstigt werden sie von plötzlich schwankenden Temperaturen zwischen der Umgebungsluft / Außentemperatur und dem Pelletlager (z. B. durch witterungsbedingten Temperaturstürze oder extreme Tag / Nachtunterschiede sowie Schwankungen der Feuchtigkeit der Pellets) /23/, /30/, /70/, /144/.

Aktuell wird eine VDI-Richtlinie erarbeitet, die den aktuellen Stand der Technik der sicheren Holzpelletlagerung beschreiben soll und dabei die Themen Geruchsbelästigung, CO-Emissionen und Explosionsgefahr aufgreift. Mit einem ersten Entwurf ist 2012 zu rechnen /236/. Weiterhin unterstützt die EU derzeit mehrere Forschungsprojekte in denen Selbstentzündungs- und Ausgasungsprozesse von Pellets untersucht werden und / oder darauf abzielen Sicherheitsdatenblätter

für den fachgerechten Umgang mit dem Brennstoff zu erarbeiten, die zur Risikominimierung beitragen sollen¹⁸.

3.4 Holzpelletnutzung

3.4.1 Pelletfeuerungsanlagen

Pelletfeuerungsanlagen zur Wärmebereitstellung sind speziell auf den Brennstoff abgestimmte Öfen / Kamine oder Kessel, die als Einzelfeuerstätten meist mit Sichtfenster (zwischen 3 bis 30 kW) oder Zentralheizungskessel (zwischen 3 bis 1 000 kW) erhältlich sind /62/, /63/, /77/. In Deutschland werden inzwischen über 400 verschiedene Anlagenmodelle angeboten, die sich sowohl konstruktiv (Beschickung, Feuerraumausstattung, Regelung etc.) als auch in ihrer technologischen Reife (Kesselwirkungsgrade, Teillastverhalten etc.) unterscheiden /63/. Zusätzlich sind Brenneraufsätze erhältlich mit denen Heizölkessel zu Pelletfeuerungen umgebaut werden können. Deren Anwendung ist jedoch eher in skandinavischen Ländern bekannt.

Während Pelletöfen zur Beheizung des Aufstellraumes meist nur mit einem Luftgebläse ausgestattet sind, können erweiterte Einzelfeuerstätten mit integriertem Wärmeübertrager (Wasserta-sche) auch zur Heizwärmebereitstellung im und außerhalb des Aufstellraumes genutzt werden sowie zur Brauchwassererwärmung beispielsweise in Niedrigenergie- oder Passivhäusern. Dagegen versorgen Zentralheizungskessel von einem geeigneten Aufstellort im Haus aus (Heizraum) die Versorgungsobjekt(e) mit Warm- und Brauchwasser über ein Leitungsverteilungsnetz /103/.

Jede Pelletfeuerungsanlage besitzt einen integrierten oder in unmittelbarer Nähe aufgestellten Brennstoffvorratsbehälter. Dieser umfasst ein Brennstoffvolumen von mehreren Tagen und kann entweder händisch mit Sackware befüllt werden oder ist mit einer vollautomatischen Brennstoffbeschickung (mittels Schneckenförderung und/ oder pneumatisch per Saugzuggebläse) mit dem Pelletlagerraum verbunden. Vom Vorratsbehälter werden die Pellets über eine Austragschnecke und oftmals eine zusätzliche Stokerschnecke in den Feuerraum befördert. Je nach Bauart, Leistungsklasse und Hersteller der Anlage lassen sich die verschiedenen Pelletzufuhrsysteme und Verbrennungsprinzipien klassifizieren. Typische Feuerungssysteme für Holzpellets stellen die in Abb. 3-10 dargestellten Schüttgutfeuerungen dar, wobei die Unterschub- und Fallschachtfeuerung einen Marktanteil von etwa 80 % abdecken (Anhang, Kapitel A.8) /68/, /77/, /82/, /152/:

- Unterschubfeuerung mit Brennmulde (Retorte bei Pelleteinsatz)¹⁹
- Fallschachtfeuerung mit Brennertopf/-schale oder Kipprost²⁰
- Quereinschubfeuerung mit fest installiertem oder beweglichem Rost²¹

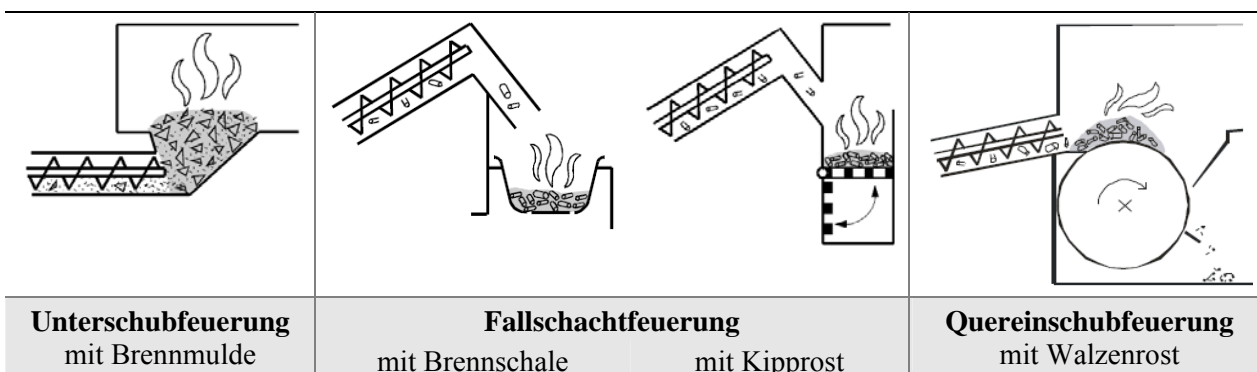


Abb. 3-10: Prinzipskizzen verschiedener Pelletfeuerungen /77/

¹⁸ z. B. im laufenden EU-Projekt "Safety and quality assurance measures along the pellet supply chain" 01/2012 – 12/2014

¹⁹ auch Retortenfeuerung genannt (Darstellung mit Brennerretorte bzw. Brennteller, Anhang, Kapitel A.8 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**)

²⁰ auch Abwurfteuerung mit Bewegrost genannt (alternativ als Sturzbrenner mit vertikalem Unterbrand ausgeführt)

²¹ auch Seiten- oder Horizontaleinschubfeuerung genannt (z. T. mit Treppenrost oder Schubboden ausgestattet)

Im Feuerraum werden die Pellets automatisch mittels Heißluftgebläse oder einem elektrischen Heizstab gezündet, wodurch die thermo-chemische Konversion des Brennstoffs einsetzt (Anhang, Kapitel A.6). Die erzeugten brennbaren Gase werden unter Luftzufuhr ausgebrannt. Die dabei freigesetzte thermische Energie wird an das Wärmeträgermedium (Luft oder Wasser) abgegeben /97/. Für die Leistungsmodulation der Feuerungsanlage wird die Brennstoffzufuhr über die Förderschnecke (mit Rückbrandsicherung) variiert / getaktet. Das Verhältnis der Brennstoff- und Luftzufuhr im Brennraum ist meist voreingestellt. In wenigen Modellen sind bisher Lambdasonden installiert /2/, /82/. Die Effizienz der Pelletkessel und -öfen schwankt je nach Hersteller, Modell und Typ sowie dem eingesetzten Brennstoff und Anlagennutzerverhalten.

- **Anlageneffizienz.** Gut dimensionierte, auf die örtlichen Gegebenheiten abgestimmte und regelmäßig gewartete Pelletfeuerungsanlagen können Wirkungsgrade von $> 90\%$ (Brennwertgeräte ca. 103 %) in Bezug auf die verfügbare Nennwärmeleistung erreichen²². Sehr gut dimensionierte Pelletkessel realisieren sogar im Teillastbetrieb Wirkungsgrade von über 86 % /123/, /159/, /245/. Allerdings sind aus der Praxis eine Vielzahl von Anlagen bekannt, deren Effizienz im Teillastbetrieb erheblich niedriger ist, da die Absenkung des Kessels auf ein Drittel seiner Nennwärmeleistung nicht modulierend erfolgt. Der Teillastbetrieb wird dann über verminderte Taktzyklen des Brennstoffeinschubes in den Feuerraum reguliert /83/, /86/.

In Bezug auf den Jahresnutzungsgrad von Pelletkesseln haben Messungen an Bestandsanlagen im Leistungsbereich bis 15 kW_{NWL} gezeigt, dass dieser aufgrund der hohen Teillastzeiten (z. B. durch jahreszeitlich schwankende Wärmenachfrage oder überdimensionierten Speichersysteme) häufig nur im Bereich zwischen 72 bis 76 % liegt²³ /124/, /219/. Neuere Kesselmodelle können Nutzungsgrade zwischen 83 und 90 % erreichen, wenn mit der Systemoptimierung der Anlage auch ein hydraulischer Abgleich des Heizungssystems, der Regelungstechnik und der Wärmespeichersysteme einhergeht /73/, /83/, /86/, /166/.

- **Emissionen.** Der Vergleich der Emissionsdaten von Holzpelletkesseln am Prüfstand und aus Felduntersuchungen in Abb. 3-1 zeigt, dass die Einhaltung bzw. Unterschreitung der Anforderungen nach der 1. BImSchV in der Praxis in der Regel kein Problem darstellt (Anhang, Tabelle A-10). Auch die seit dem Jahr 2010 gültige Verschärfung der Emissionsgrenzwerte ist für moderne automatisch beschickte Pelletfeuerungsanlagen mit Premiumpelleteinsatz meist ohne technischen Mehraufwand machbar /2/, /78/, /79/, /152/, /238/. Mit dem Inkrafttreten der 2. Stufe der 1. BImSchV-Novellierung ab 2015 können zusätzliche Primär- und Sekundärmaßnahmen²⁴ zur Feinstaubreduktion nötig sein /130/, /228/, /238/.

Im Teillastbereich zeigen Pelletfeuerungsanlagen häufig noch erheblichen Optimierungsbedarf, da es meist nicht gelingt mit einem ähnlich niedrigen Luftüberschuss zu arbeiten wie im Volllastbetrieb /83/, /86/. Tendenziell verschieben sich die Anteile der Partikelemissionen mit abnehmender Heizlast hin zu kleineren Korngrößenfraktionen. Die Ausprägung dieser Verschiebung ist umso höher, wenn die Verbrennungsqualität parallel zur Verringerung der Wärmeleistung abnimmt (gemessen am CO-Ausstoß) /79/. Mit der Verschiebung der Größenklassen, kann sich der Gewichtsanteil an Aerosolen weiter erhöhen, der bei Pelletfeuerungsanlagen in der Größenordnung von rund 90 % der Staubemissionen liegt (Kapitel 2.2.2.3). Besonders hohe Konzentration treten beim Start des Kessels und bei Lastwechseln auf /2/, /12/.

²² zum Vergleich Wirkungsgrade alternativer Brennstoffkessel: HHS-Feuerung 80 – 90 %; Scheitholzfeuerungen, Stückholz befeuerte Kachel- und Einzelöfen 40 – 75 %, Kaminöfen 15 – 60 %, offene Kamine 10 – 30 %, offene Feuerstätten 5 – 10 %; Erdgas-Niedertemperaturkessel 92 – 98 %; Erdgas-Brennwertkessel 104 – 108 %; Heizöl-Niedertemperaturkessel 85 – 96 %, Heizöl-Brennwertkessel ca. 104 % /33/, /62/, /68/, /74/

²³ Damit kann auch dem derzeit noch auf freiwilligen Basis heranzuziehendem Nachhaltigkeitskriterium eines Konversionswirkungsgrades von mindestens 85 % der RED entsprochen werden (Kapitel 2.1.3.2).

²⁴ Primärmaßnahmen, z. B. Optimierung der Brennstoffbeschaffenheit (Feinanteil, Mineralstoffanteil) und der Kesselcharakteristik (Ausbrand, Lastwechselverhalten); Sekundärmaßnahmen, z. B. Installation von Zugbegrenzer im Schornstein oder Abluftreinigungskomponenten (Zyklon, Filter, Wäscher); Brennwertnutzung (Rauchgaskondensation) /12/, /130/, /147/

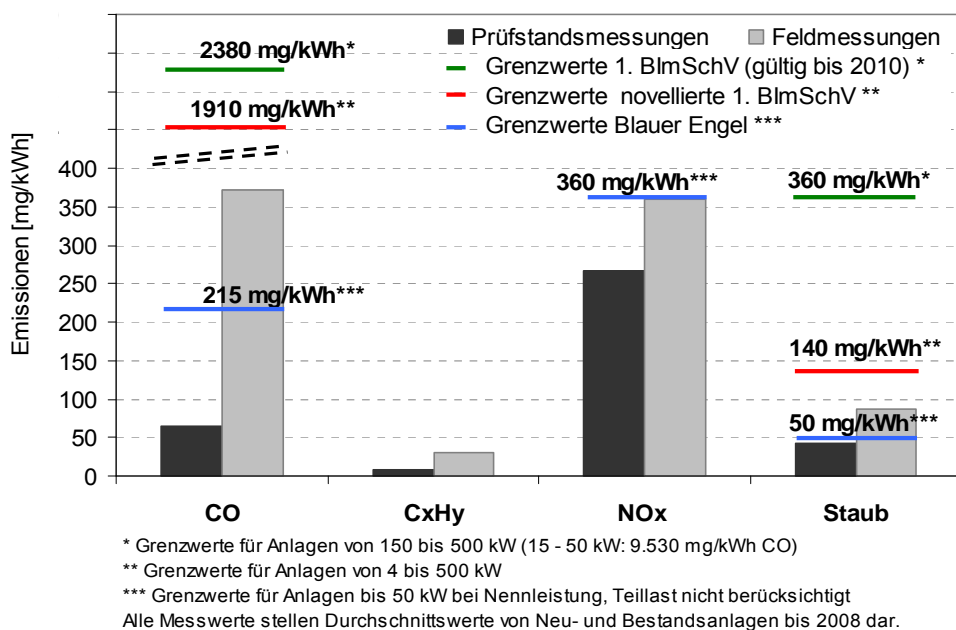


Abb. 3-1: Vergleich der Emissionen und Emissionsanforderungen an Holzpelletfeuerungsanlagen anhand von Prüfstandsmessungen und Felduntersuchungen bei Nennlast /18/, /19/, /152/, /196/

Verbrennungstests haben gezeigt, dass auch die Brennstofffestigkeit der Pellets das Abbrandverhalten und die Emissionen der Feuerungsanlage beeinflusst. Dabei korreliert der Einsatz von Pellets mit einem hohen Anteil kurzer Pellets (hohe Stückigkeit) tendenziell mit sinkenden CO-Emissionen und Gesamtkohlenstoffgehalten (TOC) im Abgas bis – je nach Feuerungsanlagendesign – eine untere Grenze erreicht ist. Parallel dazu ist eine Erhöhung des Staubgehalts im Abgas zu beobachten. Andererseits verzögert eine erhöhte Brennstofffestigkeit den optimalen Ausbrand der Pellets und die Entgasungsrate sinkt (TOC-Gehalte steigen) /2/, /259/.

3.4.2 Ascheanfall und Verschlackungsrisiko

Bei der Nutzung von qualitativ hochwertigen Holzpellets (Premiumpellets) in modernen Feuerungsanlagen muss mit einem Ascheanfall von bis zu 0,7 bis 1,5 % der eingesetzten Brennstoffmenge gerechnet werden (Anhang, Tabelle A-3). Beim Einsatz von Holzpellets mit Rinden-, Laub- oder Nadelanteilen steigt der Ascheanfall auf bis zu 3,5 % oder mehr /188/.

Die durchschnittlichen Feuerraumtemperaturen liegen in Pelletkesseln zwischen 800 bis 1 100°C und damit im üblichen Temperaturbereich von Biomassekesseln. Je nach Feuerungsanlage und Verbrennungskonditionen können im Einzelfall deutlich höhere Glutbetttemperaturen erreicht werden /2/. In Deutschland werden üblicher Weise Fichtenholzpellets eingesetzt, deren charakteristisches Ascheschmelzverhalten mit Sintertemperaturen zwischen 1 110 bis 1 340°C und einer Erweichungstemperatur zwischen 1 410 bis 1 640°C beschrieben wird /75/, /149/, /254/. Damit liegen alle kritischen Temperaturbereiche außerhalb der von Herstellern angegebenen typischen Feuerungsraumtemperaturen /173/, /248/. Somit dürften bei der Verbrennung von Premiumpellets aus reinem Fichtenholz in technisch einwandfreien Pelletfeuerungsanlagen in der Regel keine Probleme mit Ascheerweichung bzw. Verschlackung auftreten.

Ein Vergleich europäischer Analysewerte von etwa 330 Holzpelletproben hat jedoch gezeigt, dass je nach Holzart, Aufwuchsort, Rindenanteil und Bindemittelverwendung die Ascheerweichungs- und Fließtemperatur der Brennstoffe in einer Bandbreite zwischen 1 000 bis 1 570°C lag. Im Einzelfall kann der Eintrag von Sedimenten (Sand, Schmutz) während der Rohstoffbereitstellung und Verarbeitung nicht gänzlich ausgeschlossen werden, der unter anderem aufgrund hoher Si-Gehalte zu einer Senkung der Erweichungstemperaturen beiträgt. Die niedrigsten Sintertemperaturen wurden bei Holzpellets aus südeuropäischen Laubhölzern mit etwa

700°C festgestellt, während in Mitteleuropa die geringste Sintertemperatur bei 830°C, die Durchschnittstemperatur bei 1 115°C und die höchste Sintertemperatur bei 1 490°C lag /165/.

Kommt es dennoch bei der Verbrennung von Holzpellets in modernen Pelletfeuerungsanlagen zu Sintererscheinungen im Glutbett (Verbacken / Verkleben der pulverförmigen Ascheteilchen) bis hin zu Verschlackungen (Auflösung / Zerfließen der Aschepartikel), ist dies meist ein Anzeichen für den Einsatz von Pellets aus Rohstoffen mit einer niedrigen Ascheerweichungstemperatur oder von Brennstoffverunreinigungen /2/, /10/, /259/.

4 VERSUCHSPLANUNG

Aus den Ausführungen zur Charakterisierung der Brennstoffeigenschaften von Holz und Holzpellets sowie den normativen Brennstoffanforderungen folgt, dass die mechanische Festigkeit ein Brennstoffparameter ist, der sowohl auf die Bruchneigung von Pellets beim Transport, dem Umschlag und der Lagerung wirkt. Ebenso kann durch sie die durchschnittliche Pelletlänge (Brennstoffstückigkeit), der Feinanteil des Schüttguts und die Schüttdichte beeinflusst werden (Kapitel 1, 2). Somit wird die Brennstofffestigkeit als ein Indiz für die Qualität von Holzpellets herangezogen, die messtechnisch mittels Abriebtest erfasst wird (vgl. Anhang, Kapitel A.3.2).

In Anlehnung an die Zielstellung der Arbeit (Kapitel 1.2) konzentrieren sich die Ausführungen im Kapitel 4 auf die Vorbereitung der praktischen Untersuchungen zur Beeinflussung der Brennstofffestigkeit von Holzpellets für den Einsatz in KFA. Dabei werden folgende Fragestellungen thematisiert:

- Welche Brennstoffeigenschaften zeichnen die Einsatzstoffe der Praxisversuche aus?
- Welche Auswirkungen hat der gezielte Einsatz von Bindemitteln auf die Pelletierbarkeit des Spanmaterials und die Brennstofffestigkeit der Pellets?
- Beeinflusst der Einsatz von additiven Bindemitteln das Ascheschmelzverhalten der Pellets?
- Entsprechen die Versuchsbrennstoffe den Brennstoffanforderungen an Premiumpellets?

In Kapitel 4.1 werden deshalb zunächst die Einflussoptionen auf die Brennstofffestigkeit von Holzpellets bei der Pelletierung aus den Erkenntnissen aus den Kapitel 2 und 3 abgeleitet sowie mögliche Prozessparameter zur Beeinflussung der Bindungskräfte während des Herstellungsprozesses identifiziert. Anschließend erfolgt im Abschnitt 4.2 die Definition der Systemgrenzen der technischen Analyse, um die Auswirkungen der Verfahrenseingriffe auf die Prozesskette möglichst spezifisch beurteilen zu können. Im Abschnitt 4.3 wird schließlich das Konzept der praxisnahen Pelletierversuche vorgestellt und darin die Brennstoffanforderungen und Evaluierungskriterien zur Beurteilung der unterschiedlichen Versuchsbrennstoffchargen definiert.

4.1 Einflussoptionen auf die Brennstofffestigkeit während der Pelletproduktion

Eine Voraussetzung zur Erfüllung der Anforderungen an die Brennstofffestigkeit von Premiumpellets ist die Bereitstellung eines Pressguts aus hinreichend bindefähigem Material, welches die Aktivierung möglichst vieler Bindungskräfte während des Pressvorganges zulässt (Kapitel 3). Aus der Prozesskettenbeschreibung in Kapitel 3 ableitend, stellen dabei die Rohstoffaufbereitung, die Pressgutkonditionierung und die Pelletierung mehrstufige Einzelprozesse dar, deren gemeinsames Ziel es ist, aus dem im Pelletwerk verfügbaren Rohholz ein homogenes Pressmaterial mit definierten Pressguteigenschaften bereitzustellen. Der Einsatz von additiven Bindemitteln zur Pelletierung kann dies unterstützen und die Bindefähigkeit des Rohmaterials erhöhen.

Aus der Analyse der Wirkungsmechanismen und Anwendungsmöglichkeiten von Bindemitteln in Kapitel 2.3 kann abgeleitet werden, dass nach der Selektion eines stärkehaltigen PHM in einer bestimmten Konzentration und bei einem gegebenen Spanmaterial der Aktivierungserfolg des Bindemittels zur Entfaltung seiner vollen Bindekraft von folgenden Faktoren beeinflusst wird:

- Verfügbarkeit von Wasser als Lösungsmittel,
- Temperaturniveau zur Aktivierung oder Unterstützung des Quellprozesses,
- Verweilzeit des Bindemittels in der feucht(-warmen) Atmosphäre.

Deshalb hat aus Sicht der Bindemittelaktivierung der Konditionierungsprozess eine besondere Bedeutung, da er aufgrund der variable einstellbaren Betriebsparameter die Brennstofffestigkeit beeinflussen kann durch (Kapitel 3.2.2, 3.2.3):

- die Möglichkeit der Zugabe von Additiven,
- die Anpassung des Pressgutwassergehalts mittels dosierter Wassereinsprühung,

- die Möglichkeit der Steigerung des Temperaturniveaus im Pressgut mittels dem Einsatz von Warmwasser oder Dampf,
- die Homogenisierung des Pressguts mittels Anpassung der Verweilzeit und der Durchmischungsintensität des Konditionierers und Reifebunkers.

Bei einer ausreichenden Reifezeit des bindungsaktiven Pressguts in einer optimierten Atmosphäre (Wasser-, Temperaturniveau) stellt die eigentliche Pelletierung nur die Formgebung des Brennstoffs dar, die im Kühler fixiert wird. In Abhängigkeit der Konsistenz des Pressguts wird durch die Reibungskräfte während der Pelletierung eine (weitere) Temperaturerhöhung der Pressmasse stattfinden. Je nach Pressdruck (Durchsatzleistung der Presse) können diese kurzzeitig sehr hohen Temperaturen (90 bis 130°C) meist nur auf den Mantelbereich der Presslinge wirken. Durch die gezielte Anpassung des Pressdrucks (Koller-/Matrizenparameter) kann die Brennstofffestigkeit in der Presse weiter beeinflusst werden.

Alle nachfolgenden Prozessschritte der Holzpelletproduktion (Kühlung, Absiebung, Verfüllung in Transportfahrzeuge / Abpackung als Sackware oder BigBags und Lagerung) beeinflussen die Brennstofffestigkeit ebenfalls. Diese Einflussfaktoren bieten jedoch so gut wie keinen Spielraum die Brennstofffestigkeit der Holzpellets weiter zu erhöhen. Sie werden deshalb nicht in die nachfolgenden Pelletiersuche einbezogen.

4.2 Systemgrenzen der Betrachtung

Die Herstellung von Holzpellets ist ein mehrstufiger Prozess, an dem mehrere direkte (interne) und indirekte (externe) Akteure beteiligt sind und diverse technische Einzelprozesse durchlaufen werden. Die Schnittstellen zwischen den Akteuren und / oder Prozessen müssen deshalb genau definiert werden, um eine abgrenzbare Systembetrachtung durchführen zu können, die eine transparente Rückverfolgbarkeit von Ursache und Folgewirkungen ermöglicht (Abb. 4-1). Essentiell dafür ist es, den Ort des Eingriffs in der Prozesskette einzugrenzen, um anschließend dessen Wirkungsbereich auf die Folgeprozesse abzuschätzen.

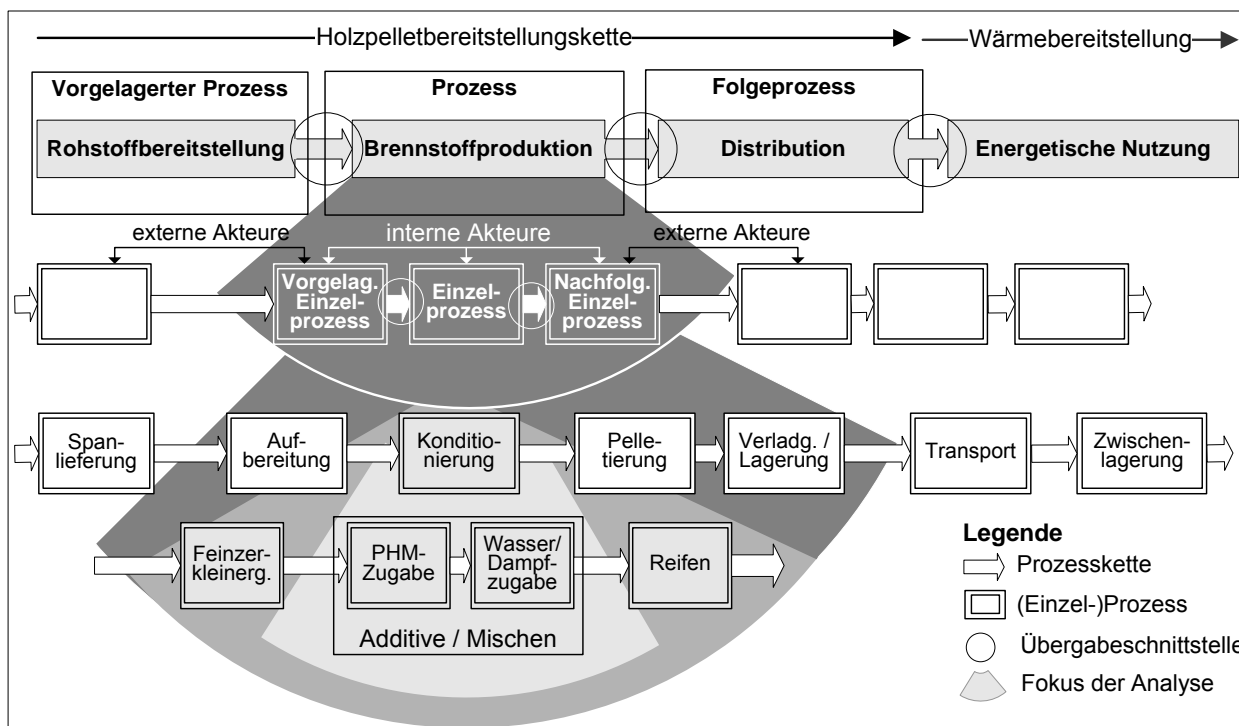


Abb. 4-1: Prinzip der Prozesskettenanalyse mit Fokus auf ausgewählte Einzelprozesse, dargestellt anhand der Holzpelletbereitstellungskette, in Anlehnung an /27/, /127/

Dazu werden unter Einsatz von additiven Bindemitteln Versuchsbrennstoffe unter Praxisbedingungen pelletiert. In Anlehnung an Abb. 4-1 und entsprechend der Ableitung der variablen Be-

triebsparameter in Kapitel 4.1 konzentrieren sich die Untersuchungen innerhalb der Brennstoffproduktion auf den Teilprozess der Konditionierung. Hier werden gezielt die Möglichkeiten zur Beeinflussung der Brennstofffestigkeit von Holzpellets durch die Manipulation des Konditionierungsprozesses (Variation der verwendeten PHM-Art und Dosis sowie der Modifikation der Pressguttemperatur durch Wasser-/Dampfzugabe) untersucht. Die Funktion aller vor- und nachgelagerten Prozesskomponenten der Holzpelletproduktion bleibt davon unberührt.

Neben dem Einfluss auf die Brennstofffestigkeit und auf das Betriebsverhalten der Pelletpresse, stehen PHM im Verdacht das Ascheschmelzverhalten der Pellets zu beeinflussen und negative Verbrennungseffekte (u. a. Versinterung, Verschlackung) hervorzurufen (Kapitel 1.1). Deshalb wird anhand labortechnischer Analysen das Ascheschmelzverhalten der Pellets mit unterschiedlichen PHM und -konzentrationen in die Diskussion zur Brennstoffcharakterisierung einbezogen.

4.3 Ansatz der Analyse und Vorgehen

Gesetzliche Verordnungen und Normen, anerkannte technische Richtlinien und Produktnormen bestimmen die Einsatzfähigkeit eines Brennstoffs und limitieren die Schwankungsbreite der brennstoffcharakterisierenden Kennwerte, um beispielsweise die Schadstoffemissionen bei der Verbrennung von Holzpellets in KFA zu begrenzen. Die zum Zeitpunkt der Untersuchungen (2005 bis 2008) geltenden Anforderungen an Holzpellets zum Einsatz in KFA werden deshalb als Status Quo-Anforderungen für die Evaluierung der Brennstofftests herangezogen (Abb. 4-2).

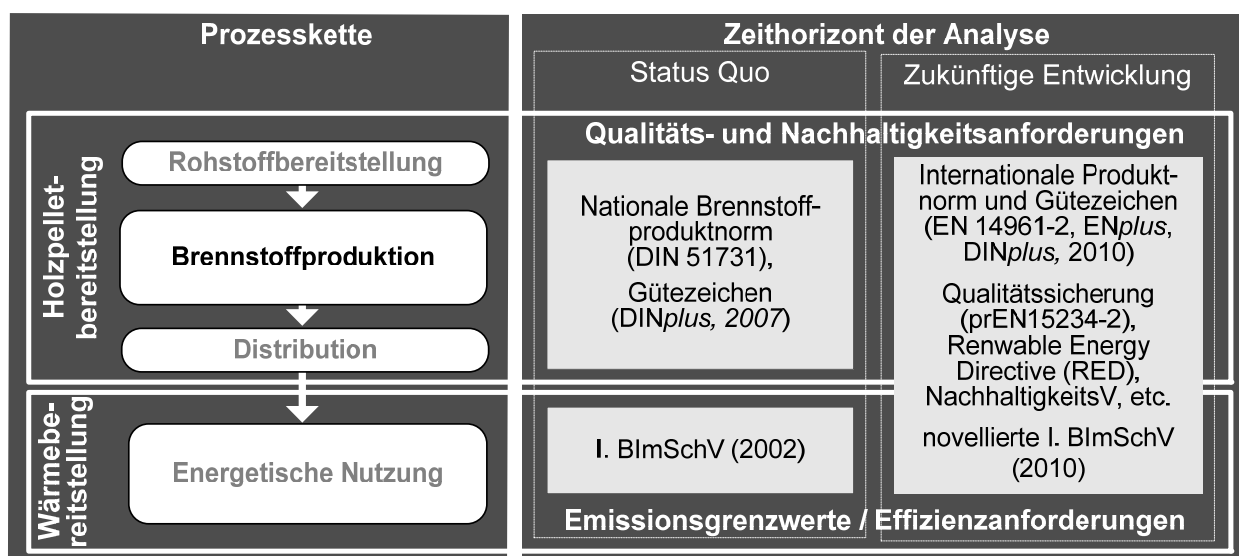


Abb. 4-2: Variable Anforderungen an die Holzpelletbereitstellung zum Einsatz in Pellet-Kleinf Feuerungsanlagen über den Betrachtungszeitraum, auszugsweise Darstellung

Um auch zukünftig einen konkurrenz- und marktfähigen Brennstoff bereitzustellen, gilt es jedoch nicht nur die aktuellen Rahmenbedingungen zu betrachten. Die technische Weiterentwicklung und Optimierung der Pelletproduktion ist darauf ausgerichtet, sich bereits heute auf die absehbaren Bedürfnisse bzw. zu erwartenden Rahmenbedingungen des zukünftigen Marktes anzupassen. So wird im Zuge der Angleichung der nationalen Qualitätsanforderungen an biogene Festbrennstoffe im europäischen und internationalen Kontext seit einigen Jahren an einheitlichen Brennstoffanforderungen für biogene Festbrennstoffen gearbeitet (Kapitel 2.1.2). Diese Normen treten sukzessiv in Kraft und schränken damit die Gültigkeit nationaler Normen ein oder setzen diese außer Kraft, was zum Teil jedoch in der Praxis zu Interpretationsspielräumen hinsichtlich der geltenden Brennstoffanforderungen führen kann²⁵. Weiterhin können zukünftig bei einer

²⁵ So bezieht sich die im Jahr 2010 in Kraft getretene novellierte I. BImSchV für KFA (Anhang, Tabelle A-10) hinsichtlich der Brennstoffanforderungen an Holzpellets auf die DINplus, 2007 und nicht auf das ebenfalls in 2010 überarbeitete DINplus-Zertifizierungsprogramm oder die im Jahr 2011 in Kraft getretene DIN EN 14961-2.

Spezifizierung der europäischen Renewable Energy Directive (RED) oder einer Verschärfung der Anforderungen einzelner Brennstoffzertifizierungen zusätzliche Anforderungen auf Pelletproduzenten hinzukommen (z. B. *ENplus*, Blauer Engel) – auch hinsichtlich von Nachhaltigkeitsanforderungen (Kapitel 2.1.3).

Deshalb wird im Rahmen der Einordnung der Ergebnisse aus den Pelletversuchen geprüft, ob die Brennstoffeigenschaften der Holzpellets auch den erhöhten „mittelfristig“ geltenden Anforderungen entsprechen, soweit diese bereits bekannt sind.

Ausgehend von der Analyse der brennstofftechnischen Anforderungen an Premiumpellets in Kapitel 2.1, wurde in Tabelle 4-1 eine Auswahl an Evaluierungskriterien aus den Brennstoffanforderungen abgeleitet und für die Analyse und Evaluierung der produzierten Versuchschargen herangezogen werden. Dabei konzentriert sich die Auswahl auf typische Parameter zur Diskussion der Brennstofffestigkeit (z. B. geometrische Abmessungen / Stückigkeit, Wassergehalt, Abrieb, PHM-Einsatz) und auch auf chemisch-stoffliche Inhaltsstoffe (z. B. Asche-, Schwefel-, Stickstoffgehalt), die einen Hinweis auf Veränderungen in der charakteristischen Zusammensetzung der Pellets durch die PHM-Zugabe geben können.

Tabelle 4-1: Evaluierungskriterien für die Brennstoffproben anhand der im Versuchszeitraum (DIN 51731, 1997 / *DINplus*, 2007) und zukünftig (EN 14961-2, 2011 / *ENplus*, 2010 / *DINplus*, 2010) geltenden brennstofftechnischen Anforderungen an Premiumpellets /42/, /44/, /188/

Parameter ^{a)}	Einheit	DIN 51731	<i>DINplus</i> (2007) ^{b)}	EN 14961-2, A1 / <i>ENplus</i> , A1 / <i>DINplus</i> (2010)	EN 14961-2, A2 / <i>ENplus</i> , A2
Stückigkeit (D x L)					
Durchmesser, D	mm	4 - 10	4 - 10	6 ± 1	6 ± 1
Länge, L	mm	< 50	≤ 5 x D	3,15 - 40	3,15 - 40
Wassergehalt, W	%	≤ 12	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Mechanische Festigkeit, DU	%	-	-	≥ 97,5	≥ 97,5
Abrieb	%	-	≤ 2,3	-	-
Feinanteil, F	%	-	-	≤ 1 / 0,5 ^{c)}	≤ 1
PHM ^{d)}	%	keine	≤ 2	≤ 2	≤ 2
Schüttdichte, BD	kg/m ³	-	-	≥ 600	≥ 600
Heizwert, Hi _{wf}	MJ/kg	17,5 - 19,5	≥ 18	16,5 - 19	16,5 - 19
Aschegehalt, A _{wf} ^{e)}	Gew.-%	≤ 1,5	≤ 0,5	≤ 0,7	≤ 1,5
Ascheschmelzverhalten		-	-	SST, DT, HT, FT ^{f)}	
Stickstoffgehalt, N _{wf}	Gew.-%	≤ 0,30	≤ 0,30	≤ 0,30	≤ 0,30
Schwefelgehalt, S _{wf}	Gew.-%	≤ 0,08	≤ 0,04	<0,03	<0,03
Chlorgehalt, Cl _{wf}	Gew.-%	≤ 0,03	≤ 0,02	<0,02	<0,02

^{a)} Weitere Brennstoffparameter, zulässige Schwankungsbreiten und Nebenbestimmungen siehe Tabelle A-3

^{b)} *DINplus* vereint seit 2007 die Brennstoffanforderungen der DIN-Norm 51731 und der ÖNORM M 7135; diese Qualitätsanforderungen an Holzpellets galten bis zur Novellierung der *DINplus* im Jahr 2010 (Kapitel 2.1.2)

^{c)} 0,5 % gilt nur für *DINplus*-Verpackungseinheiten bis 20 kg, ansonsten 1 %

^{d)} Bei *DINplus* dürfen nur chem. unveränderte Produkte aus der primären land- und forstwirtschaftlichen Biomassen als PHM verwendet werden; nach EN muss lediglich Art und Menge des PHM-Einsatzes dokumentiert werden.

^{e)} Die Aschegehaltsanforderungen sind nicht direkt vergleichbar, da die Analyse bei unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt wird (DIN 51719 / *DINplus*, 2007 bei 815°C; EN 14961-2 / *DINplus* (2010) / *ENplus* bei 550°C).

^{f)} Dokumentation von SST shrinking starting temp., DT deformation temp., HT hemisphere temp., FT flow temp. (Kapitel 5.4) bei EN-14961-2 informativ; bei *DINplus* (2010) ist DT normativ; bei *ENplus* ist DT normativ und limitiert (für A1 ≤ 1 200°C, für A2 ≤ 1 100°C, Ascheprobekörper muss für Analyse bei 815°C hergestellt werden)

Nach der DIN 51731, die zwar noch gültig ist, jedoch in den letzten Jahren erheblich an Bedeutung verloren hat, ist die Verwendung von PHM bei der Pelletherstellung nicht zulässig. Da die-

se jedoch im Fokus der Untersuchungen dieser Arbeit stehen, wird für die nachfolgende Status Quo-Evaluierung der Brennstofftests die Anforderungen des Zertifizierungsprogrammes der *DINplus* aus dem Jahr 2007 herangezogen, die zum Zeitpunkt der praktischen Versuchsdurchführung (2005 bis 2008) galten. Als mittelfristige Brennstoffanforderungen wird die EN 14961-2 für die nicht-industrielle Holzpelletnutzung als Vergleichsstandard genutzt, auf deren Basis im Jahr 2010 das *DINplus*-Zertifizierungsprogramm überarbeitet und das *ENplus*-Zertifizierungsprogramm neu im Markt eingeführt wurde (Anhang, Tabelle A-3).

4.3.1 Charakterisierung der Einsatzstoffe

Zunächst wird das verwendete Holzrohmaterial zur Pelletierung entsprechend den Vorgaben der EN 14961-1 spezifiziert (Kapitel 2.2). Anschließend erfolgt die Laboranalyse der chemisch-stofflichen Eigenschaften der Einsatzstoffe zur Einordnung gegenüber den geltenden Grenzwertanforderungen nach *DINplus* (2007) und der EN 14961-2.

4.3.2 Pelletierbarkeit des Materials und Brennstofffestigkeit

Die gezielte Variation der Art und Dosierung des PHM-Einsatzes bietet eine Möglichkeit zur Beeinflussung der Brennstofffestigkeit. Eine weitere Option stellt die Rohmaterialaktivierung mittels Wasser-/Dampfzugabe im Konditionierer dar (Kapitel 2.3). Im Rahmen der Versuchsbrennstoffproduktion werden deshalb beide Ansätze untersucht. Dafür wird ein systematischer Versuchsplan (Abb. 4-3) zur Produktion von Brennstoffchargen erstellt mit:

- variierenden Presshilfsmitteln und Konzentrationen sowie
- mit variierenden Konditionierungsmaßnahmen (Wasser- / Heißdampfeinsatz)

Um die Wirkung der Konditionierungsmaßnahmen beurteilen zu können, werden während der Brennstoffproduktion verschiedene technische Prozesskenngrößen erfasst. Dazu zählt:

- Die Verfügbarkeit von Wasser als Lösungsmittel im Pressgut (Messung des Wassergehalts der Einsatzstoffe im Konditionierer),
- Das Temperaturniveau zur Aktivierung des holzeigenen Lignins und des Quellprozesses der PHM (Messung der Temperatur der Einsatzstoffe im Konditionierer),
- Die Presstemperatur zur Unterstützung der o. g. Aktivierungsprozesse (Messung des Temperaturniveaus an den Kollern, da aufgrund der Rotations- und Massebewegungen in der Presse die Erfassung der Temperatur des Pressguts selbst direkt nicht möglich ist),
- Die Pellettemperatur nach der Abkühlung und -siegung der Presslinge (Messung der Pelletoberflächentemperatur am Produktionsausgang),
- Die Brennstofffestigkeit des Endproduktes (Messung des Pelletabriebs).

Bis auf die Pellettemperatur und Brennstofffestigkeit werden die genannten Prozessparameter von der Anlagenregelungstechnik in periodischen Zeitabständen automatisiert erfasst und gehen als Mittelwerte in die Datenanalyse in Kapitel 5.3 ein. Die Pelletoberflächentemperatur wird mittels Infrarot gemessen und die des Abriebs mittels eines Lignotesters vor Ort. Die Verweilzeit des Pressguts im Konditionierer und Reifebunker ist über alle Messreihen konstant.

Um die Komplexität der Ursache- / Wirkungsmechanismen einzuschränken, wird die Parametervariation der Rohmaterialkonditionierung in 2 Versuchsreihen durchgeführt (1 x ohne / 1 x mit Dampfkonditionierung) und der Einsatz sowie die Dosierung der PHM in jeder Versuchsreihe beschränkt. In die SOLL-Wert-orientierte automatische Befeuchtungsfunktion des Konditionierers ($W = 11\%$) wird nicht eingegriffen.

Parallel zur Pelletierung werden die Versuchsbrennstoffe auf ausgewählte chemisch-stoffliche und physikalisch-mechanische Brennstoffkennwerte labortechnisch analysiert und den Evaluierungskriterien der brennstofftechnischen Anforderungen an Holzpellets für den Einsatz in KFA (Kapitel 4.3) gegenübergestellt.

Abb. 4-3 skizziert zusammengefasst das Vorgehen während der Pelletiersuche anhand eines Versuchsplans. Die Anzahl der Versuchsreihen und Selektionsziele werden ebenso dargestellt, wie die Umsetzung der unterschiedlichen PHM-Dosierungen und Konditionierungsmaßnahmen bei den einzelnen Brennstoffchargen.

Von jeder Versuchscharge wird ein BigBag mit etwa 800 bis 1 000 kg Pellets für Labor- und Abbrandversuche abgefüllt, wenn die Pelletierung einen stabilen Produktionsbetrieb erreicht hat. Die Art und Menge der verwendeten PHM wird in den anschließenden Erläuterungen zum Versuchsplan beschrieben.

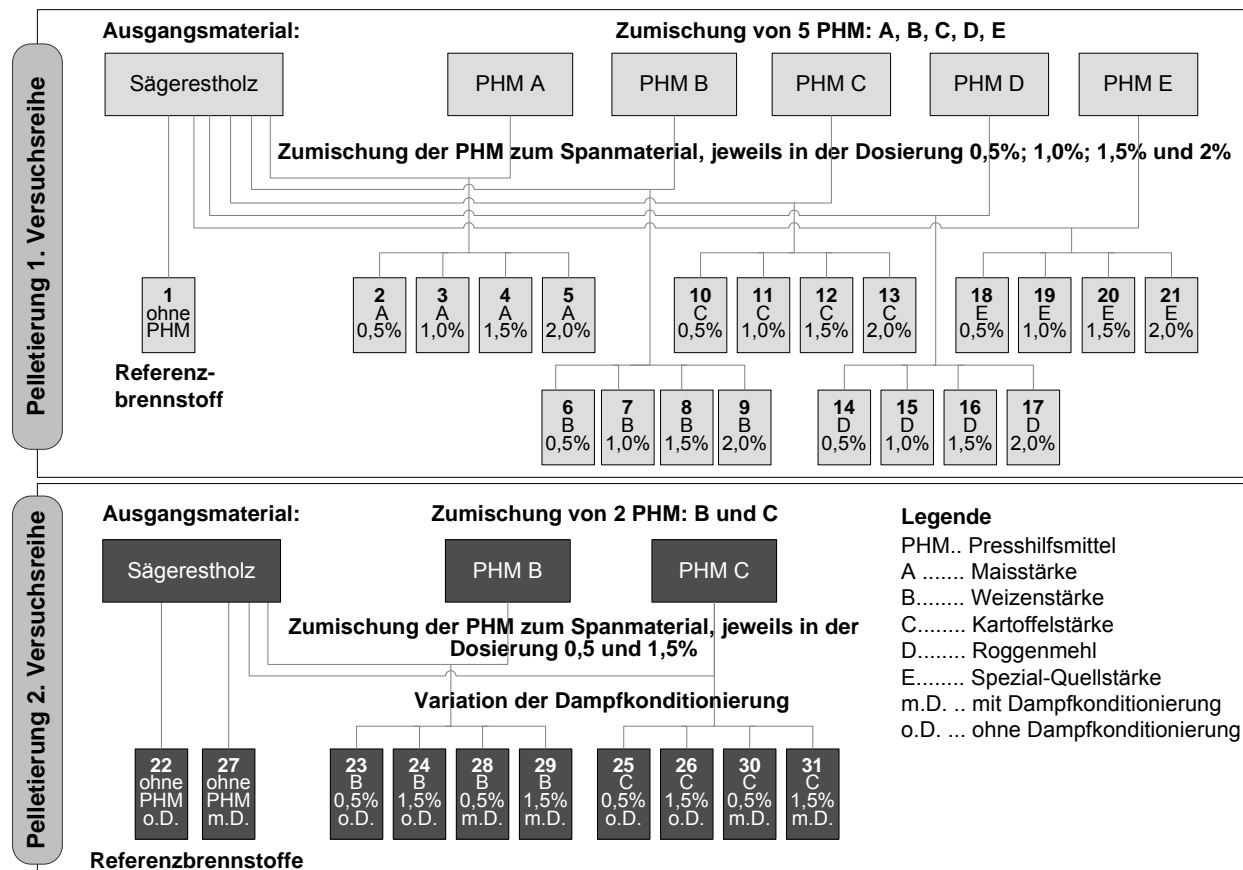


Abb. 4-3: Versuchsplan zur Produktion von 31 Holzpelletchargen

- **1. Versuchsreihe – Einsatz stärkehaltiger PHM unterschiedlicher Konzentration.** Praxisüblich ist der Einsatz von Mais- oder Weizenstärke als PHM zur Pelletierung. Es existieren jedoch kaum Untersuchungen zur Eignung und Wirksamkeit der Vielzahl sonstiger am Markt verfügbarer Stärken. Deshalb wird für die Pelletiersuche eine Palette handelsüblicher stärkehaltiger PHM in Pulverform ausgewählt, die einerseits das verfügbare Marktspektrum aufzeigen und andererseits relativ kostengünstig bereitgestellt werden können.
 - A: native Maisstärke, Handelsbezeichnung; C•Gel 03401
 - B: native Weizenstärke, Handelsbezeichnung; PT 20002
 - C: native Kartoffelstärke, Handelsbezeichnung; C•Gel 30002
 - D: Roggenmehl (native Stärkebasis), Handelsbezeichnung; Roggen 1370
 - E: thermisch modifizierte Maisstärke (Spezial-Quellstärke); C•Plus 12015
 Die Dosierung der 5 PHM für die Produktion der Versuchsbrennstoffe erfolgt mit unterschiedlichen Konzentrationen: 0,5 %, 1,0 %, 1,5 % und 2,0 %.
- **2. Versuchsreihe – Einsatz von Dampf zur Pressgutkonditionierung.** Zur Verifikation der Ergebnisse der 1. Versuchsreihe (1. VR), werden innerhalb der 2. Versuchsreihe (2. VR) z. T. Wiederholungstest zur Brennstoffproduktion mit Weizen- und Kartoffelstärke durchgeführt.

Zusätzliche Brennstoffchargen werden mit Heißdampf konditioniert, um eine Temperaturerhöhung des Pressguts im Konditionierer zu erreichen.

Bei jeder VR wird eine Brennstoffcharge ohne PHM-Zusatz als Referenzbrennstoff produziert, um im direkten Vergleich die Wirkungseffekte der Parametervariation evaluieren zu können.

4.3.3 Ascheschmelzverhalten

Für die Beurteilung des Einflusses der PHM auf das Ascheschmelzverhalten der Brennstoffe werden zusätzlich Laboranalysen charakteristischer Spurenelemente und der Ascheschmelztemperaturen durchgeführt. Für die analytische Bestimmung der kritischen Temperaturphasen wird die zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung gültige DIN 51730 herangezogen. Unter Einbezug weiterer Indizien, wie Näherungsformeln zur Abschätzung der Verschlackungs-/ Versinterungsneigung eines Brennstoffs, wird der Einfluss der PHM-Zugabe auf das Ascheschmelzverhalten von Holzpellets verifiziert.

4.3.4 Einordnung der Brennstoffeigenschaften

Abgerundet werden die Brennstoffuntersuchungen mit der Einordnung der Versuchspelletchargen entsprechend den bestehenden Brennstoffanforderungen der DIN *plus* (2007) und der im Jahr 2011 in Kraft getretenen EN 14961-2 (Abb. 4-2). Dabei werden neben der Nutzung der Laboranalysewerte zusätzlich die Stückigkeit (Länge, Durchmesser) und Schüttdichte der Brennstoffe ermittelt.

4.4 Messtoleranzen und Datenunsicherheiten

Die Herstellung aller Brennstoffchargen findet im Rahmen von zwei Versuchsreihen innerhalb eines Jahres statt. Die Versuchsbrennstoffproduktion der ersten Versuchsreihe benötigt mehrere Tage, da zum Freifahren der Anlage sowie zur Einstellung konstanter Betriebsbedingungen je PHM-Einsatz allein etwa 1,5 Stunden notwendig sind (Anhang, Tabelle A-6). Während dieser Zeit kommt es zu natürlichen Schwankungen der Außentemperatur, die sich auf die Rohstoffeigenschaften aus dem Nassspanlager bemerkbar machen.

Die Späneigenschaften des Rohmaterials sind somit einer natürlichen Schwankungsbreite unterworfen (z. B. durch saisonale und Tageszeit-abhängige Außentemperaturschwankungen; unterschiedliche Herkunft / Aufwuchsstandorte des Holzes, insbesondere zwischen der 1. und 2. VR). Dadurch kann es trotz gleichem Spanlieferanten und Homogenisierungsmaßnahmen zu leichten Variationen der Roh- und Brennstoffeigenschaften kommen, die unter Praxisbedingungen toleriert werden müssen. Für die Evaluierung der Brennstoffproben wird deshalb beim Vergleich der Brennstoffeigenschaften immer die Referenzprobe (ohne PHM) der jeweiligen Versuchsreihe einbezogen, um eine konstante Vergleichsbasis zu haben.

Die fünf verschiedenen PHM wurden für beide Versuchsreihen in ausreichender Menge in einer Lieferung gekauft und im Pelletwerk fachgerecht gelagert. Somit kann seitens der PHM von relativ homogenen Rohstoffeigenschaften ausgegangen werden /2/.

Die Pelletierung des Spanmaterials findet unmittelbar nach der Anlieferung des Rohstoffs im Werk statt. Im Freilager kann es jedoch schon innerhalb weniger Tage zu witterungsbedingten Verunreinigungen der Späne kommen (z. B. durch Regen, Schnee), die ebenfalls zu Variationen der Rohstoffeigenschaften führen können, wenn die Fremdkörperabscheidung diese nicht vollständig aussortiert bzw. aussortieren kann /27/, /191/.

Während der Produktion der Versuchschargen kann es zu technisch bedingten Anlagenausfällen kommen, die einen Umbau bzw. Auswechslungen an der Versuchspelletierstrecke erfordern und die Messergebnisse der Roh-/Brennstoffanalysen beeinflussen können. Beispielsweise musste während der ersten Versuchsreihe bei der Pelletierung der Brennstoffchargen 18 bis 21 der Anlagenbetrieb unterbrochen werden. Die Versuche fanden wenige Tage später mit dem gleichen Spanmaterial statt /255/.

Die beschriebenen Brennstoffanalysen der Versuchsbrennstoffe können aufgrund begrenzt vorhandener Analysegeräte nur z. T. unmittelbar im Pelletwerk stattfinden (z. B. Mechanische Festigkeit mittels Abriebstester). Der größere Anteil wird in einem externen Labor analysiert. Das Probenmaterial kann während des Transportes (und ggf. auch während der Probenaufbereitung) weiteren Veränderungen unterliegen, die jedoch bei fachgerechter Handhabung im Toleranzbereich der Analyseergebnisse liegen sollten.

Zur Verifizierung der Analysedaten nach den gültigen DIN-Normen finden alle Laboruntersuchungen mindestens 2-fach statt. Die ermittelten Daten werden als Mittelwerte mit einer Messtoleranz von $\pm 10\%$ in die Ergebnisdiskussion einbezogen. Aufgrund der minimalen Anteile der Spurenelemente in den Einsatzstoffen erfolgt zu deren analytischen Bestimmung eine 4-fach-Analyse. Hier ist ein Toleranzbereich von $\pm 20\%$ in die Diskussion einzubeziehen, um Messungenauigkeiten auszuschließen²⁶ /2/.

Das Ascheschmelzverhalten kann sowohl analytisch als auch rechnerisch ermittelt werden. Unabhängig von der angewandten Methode ist zu beachten, dass die Schwankungsbreite zwischen den charakteristischen Ascheerweichungs- und Ascheschmelzphasen z. T. stark variiert. Entsprechend der Literatur und den Erfahrungen von Analyselabors sollen sowohl bei der Anwendung der rechnerischen Näherungsformeln als auch bei der Bestimmungsmethode nach DIN 51730, Temperaturtoleranzen von $\pm 50^\circ\text{C}$ in die Ergebnisbewertung einbezogen werden /3/, /102/, /246/, /247/. Diese relativ hohe Unsicherheit kann erst minimiert werden, wenn das Zusammenwirken aller Ascheanteile weitestgehend bekannt ist.

Für die Analyse der Brennstoffstückigkeit (Längenverteilung) existiert zum Zeitpunkt der Durchführung der Praxisversuche kein normiertes Verfahren. Deshalb werden von der zu untersuchenden Brennstoffcharge 300 g Pellets entnommen und händisch nach Größenklassen anhand einer selbst angefertigten Schablone sortiert.

²⁶ Die analysetechnischen Schwierigkeiten bei der Bestimmung von biogenen Festbrennstoffbestandteilen sind bekannt und haben dazu geführt, dass seit einigen Jahren auf EU-Ebene neue Methoden und Testverfahren entwickelt werden, die zur Reduzierung der Schwankungsbreite bzw. Fehlerquote bei der Laboranalyse führen sollen (Anhang, Tabelle A-5). Da zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung jedoch nur EN-Vornormen (prEN) veröffentlicht waren, werden diese nicht für die Laboranalyse herangezogen. Die Probenahme, Elementar- und Ascheanalysen werden deshalb nach den gültigen DIN-Normen durchgeführt.

5 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG UND ERGEBNISSE

Ausgehend von der Versuchsplanung in Kapitel 4 erfolgt im Abschnitt 5.1 die Beschreibung der Pelletieranlage sowie die Erläuterung der wesentlichen Randbedingungen der Versuchsanordnung. Anschließend werden in den Kapiteln 5.2 bis 5.5 die Ergebnisse der Pelletierversuche vorgestellt.

5.1 Anlagenbeschreibung

Die Produktion der Versuchsbrennstoffe erfolgt in einem kommerziell betriebenen Pelletwerk mit einer durchschnittlichen Holzpelletproduktion von 35 000 t pro Jahr. Die Anlage arbeitet mit normalerweise 2 Pelletpressen im 24-Stundenbetrieb 7 Tage pro Woche. Während der Versuche wird eine konstante Pelletproduktionsleistung regelungstechnisch sichergestellt (Ampereführung der Presse, 5 500 kg/h). So kann gewährleistet werden, dass alle Versuchsergebnisse möglichst authentisch – unter praxisnahen Bedingungen – ermittelt werden.

In Abb. 5-1 ist der Aufbau der Pelletproduktionslinie skizziert. In Anlehnung an die Gliederung des Brennstoffproduktionsprozesses in Kapitel 3.2 und in Ergänzung an die dort gegebenen Prozessbeschreibungen wird nachfolgend nur auf die Besonderheiten der Versuchspelletierung eingegangen.

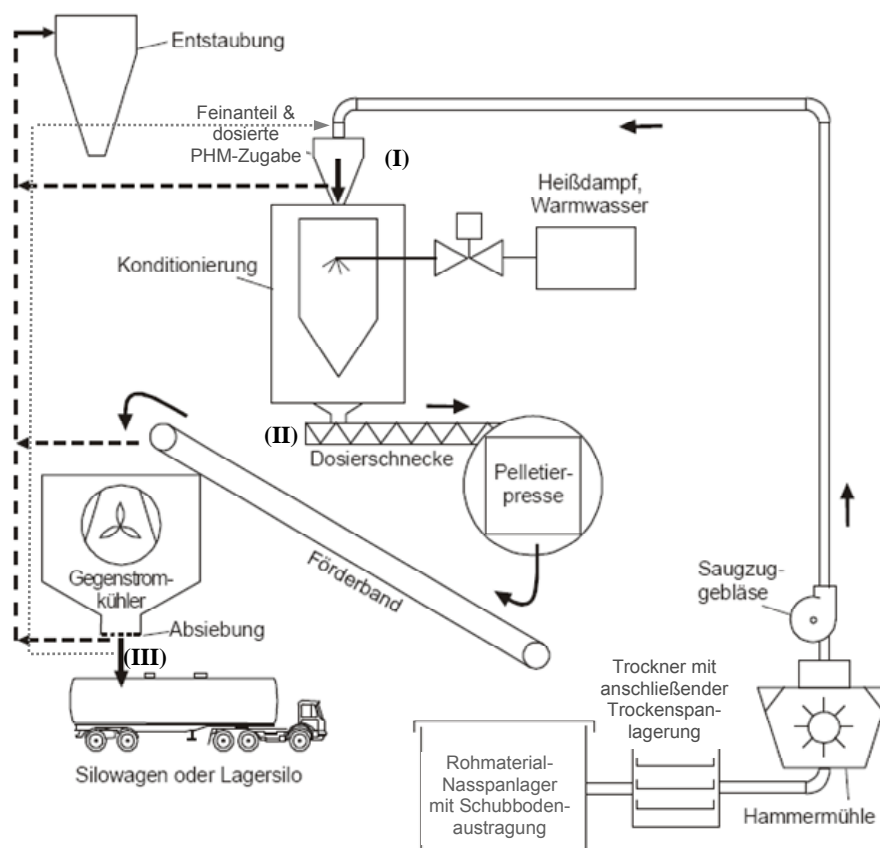


Abb. 5-1: Vereinfachte Darstellung der Holzpelletproduktion in Langenbach einschließlich der Versuchsstationen I, II und III

5.1.1 Rohmaterialbereitstellung

Die Rohstoffversorgung des Pelletwerks erfolgt vorrangig durch ein regionales Sägewerk per LKW mit Spanmaterial aus dem Einschnitt von Fichtenholz. Nähere Informationen zum verarbeiteten Rohholz des Sägewerkes (Alter, Aufwuchsort, Lagerzeiten und -bedingungen etc.) und damit der Spanherkunft liegen dem Pelletierer nicht vor. Dies ist bei der Verarbeitung von Industrieresthölzern häufig der Fall, da hier das Spanmaterial „nur“ als Rest- bzw. Nebenprodukt

der Säge- und Holzwerkstoffindustrie gehandelt wird. Beim Einsatz von Frischholz zur Pelletierung sollte eine Rückverfolgung der Rohstoffherkunft besser möglich sein.

Die ausgewählten PHM werden von einem international tätigen Stärkefabrikanten erworben. Der Einkauf erfolgte in einem ausreichenden Umfang in sortenreiner Abpackung, um eventuelle Variationen der PHM-Eigenschaften durch einen Nachkauf zu vermeiden.

5.1.2 Brennstoffproduktion

5.1.2.1 Aufbereitung

Die vom Sägewerk angelieferten Späne werden zunächst auf einer betonierten Freifläche ohne Wetterschutz gelagert und anschließend per Schublader auf den überdachten Schubboden des Nassspanlagers aufgebracht. Während der Versuchspelletierung wird die ansonsten übliche Vermischung des Spanmaterials während der Schubbodenbefüllung mit dem Rohmaterial anderer Lieferanten vermieden. Damit werden für alle Versuchsreihen möglichst homogene / sortenreine Rohmaterialeigenschaften gewährleistet. Über den Schubboden und einen Kratzkettenförderer werden die Späne aus dem Nassspanlager automatisch zur Trocknung in den Niedertemperatur-Bandrockner transportiert. Bevor die Späne in einer Hammermühle zerkleinert werden, erfolgt die Abscheidung metallischer Verunreinigungen und von Steinen.

5.1.2.2 Konditionierung

Im normalen Fertigungsbetrieb des Pelletwerks erfolgt die automatische PHM-Zumischung direkt nach der Hammermühle. Anschließend durchläuft das Rohmaterial einen Schlauchfilter, in dem die mitgeführte Luft von den festen Bestandteilen gereinigt wird. Um ein Verkleben des Schlauchfilters durch unbekannte PHM zu vermeiden, werden diese während der Versuchspelletproduktion erst nach dem Schlauchfilter zudosiert (Abb. 5-1, Pkt. I). Hierzu wird die Feinantilrückführung des Rüttelsiebes genutzt.

Das Rohmaterial gelangt in den Konditionierer, wo – entsprechend dem konventionellen Pelletierprozess – automatisiert Wasser bzw. Dampf zugegeben wird. Die Homogenisierung der Spantemperatur und des Wassergehalts sowie der PHM-Verteilung innerhalb des Pressguts wird durch die Durchmischung im Konditionierer und Reifebunker erreicht. Zur Bestimmung der Brennstoffeigenschaften der Einsatzstoffe vor der Pelletierung erfolgt nun die Probenahme des Materials für die Laboranalyse (Abb. 5-1, Pkt. II) sowie die automatisierte Messung von Spantemperatur und -wassergehalt²⁷.

5.1.2.3 Pelletierung

Aus dem Reifebunker wird das Spanmaterial von einer Dosierschnecke zu einer der zwei am Standort vorhandenen Kollergangpressen mit Ringmatrizen transportiert und anschließend pelletiert. Dabei erfolgt viertelstündlich die näherungsweise Bestimmung der Temperaturschwankungen des Pressguts mittels einer Temperatursonde an den Kollern der Presse (nachfolgend Press-temperatur genannt).

Nach der Pelletierung durchlaufen die noch heißen Presslinge einen luftdurchströmten Gegenstromkühler, in dem die Pellets abkühlen und aushärten. Direkt nach dem Kühler werden zu kurze Pellets, lose Spanteilchen und Bruchkanten mit Hilfe eines Rotationssiebes ausgesondert ($\leq 3,15$ mm) und über die Feinantilrückführung an der Hammermühle wieder in den Produktionsprozess eingebracht. Unmittelbar am Rüttelsieb findet die Probenahme für die Bestimmung der Pellettemperatur und der mechanischen Festigkeit (Abriebtest) der Brennstoffe statt (Abb. 5-1, Pkt. III).

²⁷ Die beiden Produktionsparameter sind eigentlich die Pressguttemperatur- und der Pressgutwassergehalt im Konditionierer. Sie werden nachfolgend (und in der Praxis) aber als Spantemperatur- und Spanwassergehalt bezeichnet, um Verwechslungen mit dem Parameter der Presstemperatur (in den Kollerachsen der Presse gemessen) zu vermeiden.

5.1.2.4 Verladung

Bei der kommerziellen Pelletproduktion werden die Pellets vom Rüttelsieb aus über ein Becherwerk in die Brennstoffsilos oder zur Direktverladung gefördert. Im Fall der Versuchsbrennstoffe erfolgt hier die Abfüllung der Pellets in BigBags.

5.2 Charakterisierung der Einsatzstoffe

Bei dem verwendeten Ausgangsmaterial für die Pelletversuche handelt es sich um chemisch unbelastete Sägewerksnebenprodukte (SNP) von Fichtenholz ohne Rinde /2/; dieses Material stellt damit das in Deutschland derzeit am weitesten verbreitete Rohmaterial zur Holzpelletproduktion dar²⁸. In Anlehnung an die DIN EN 14961-1 zur Spezifizierung und Klassifizierung von Festbrennstoffen kann das angelieferte Spanmaterial somit über die Kennziffer 1.2.1.2 spezifiziert werden. Zur Einordnung der zu erwartenden brennstofftechnischen Kennwerte des Spanmaterials wird Annex B, Spalte 3 der DIN EN 14961-1 (Stammholz und Nebenprodukte von chemisch unbehandelten Nadelhölzern ohne bzw. mit unbedeutenden Anteilen von Rinde und Nadeln, Tabelle 2-4) herangezogen und in Tabelle 5-1 vergleichend gegenüber gestellt.

Zur Charakterisierung der chemisch-stofflichen Eigenschaften der Ausgangsmaterialien wurden die Sägespäne und 5 Presshilfsmittel hinsichtlich ihrer brennstofftechnischen Kennwerte im Labor untersucht. In Tabelle 5-1 sind die kennzeichnenden Brennstoffparameter des SNP (Nadelholz) im Vergleich zu anderen Holzsortimenten dargestellt.

Tabelle 5-1: Brennstofftechnische Analyse des Rohmaterials für die Pelletversuche im Vergleich zu den Evaluierungskenngrößen der EN 14261-1 und der DINplus (2007)

Parameter	Asche _{wf} Gew.-%	H _{swf} MJ/kg	Hi _{wf} MJ/kg	C _{wf} Gew.-%	H _{wf} Gew.-%	N _{wf} Gew.-%	S _{wf} Gew.-%	Cl _{wf} Gew.-%	O _{add, wf} Gew.-%
Späne 1. VR	0,54	20,00	18,57	56,88	6,57	0,33	u. B.	u. B.	36,21
Späne 2. VR	0,42	20,15	18,88	54,30	5,81	0,27	u. B.	u. B.	39,58
EN 14961-1 ^{b)} , - Spannbreiten	0,1-1	20,0 - 20,8	18,8- 19,8	47-54	5,6-7,0	<0,1- 0,5	<0,01- 0,02	<0,01- 0,03	40-44
- typische Werte	0,3 ^{a)}	20,5	19,1	51	6,3	0,1	<0,02	0,01	42
PHM (Spann- breite aller 5) ^{c)}	0,09 – 1,45	17,5 – 18,7	15,8 – 17,1	50,4 – 52,5	6,5 -7,6	0,2 – 1,8	<0,05 – 0,1	u. B.	38,4 – 42,8
DINplus (2007)	≤ 0,50 ^{a)}	-	≥ 18,0	-	-	≤ 0,30	≤ 0,04	≤ 0,02	-

u. B. ... Analysewert lag unterhalb der Bestimmungsgrenze von 0,01; wf ...wasserfrei; H_s ...Brennwert; H_i ... Heizwert; C...Kohlenstoffgehalt; N ...Stickstoffgehalt; S ...Schwefelgehalt; Cl ...Chlorgehalt, O_{add}... additiv bestimmter Sauerstoffgehalt

^{a)} der Aschegehalt der beiden Normen ist nicht direkt vergleichbar, da bei unterschiedlichen Veraschungstemperaturen die Analyse durchgeführt wird (DINplus bei 815°C lt. DIN 51719; prEN 14961-2 bei 550°C lt. EN 14775). Die Analysen der Versuchrohstoffe wurden nach DIN durchgeführt.

^{b)} Angaben stellen Spannbreiten bzw. typische Werte für Nadelhölzer ohne Rinde nach DIN EN 14961-1 dar

^{c)} Einzelwerte der PHM im Anhang, Tabelle A-7

Die Analyse der verwendeten Rohmaterialien für die 1. und 2. VR zeigt, dass prinzipiell beide Spansorten für die DINplus-Pelletproduktion geeignet sind. Demnach handelt es sich bei dem verwendeten Spanmaterial um weitestgehend „typische“ Nadelhölzer (ohne Rinde) mit den dafür kennzeichnenden charakteristischen Eigenschaften. Insbesondere das Spanmaterial der 2. VR zeigt eine gute Übereinstimmung mit den Durchschnittswerten der DIN EN 14961-1. Die Eigenschaften des Spanmaterials der 1. VR überschreiten hinsichtlich des Stickstoff- und Aschegehalts geringfügig die Variationsbreite nach DIN EN 14961-1, präsentieren aber ähnliche Brennstoffei-

²⁸ In den vergangenen 3-4 Jahren schwankte der SNP-Anteil am Rohmaterialinput zur Pelletproduktion in Deutschland – parallel zum Ausbau der Produktionsstätten und konjunkturellen Markt – zwischen 70 bis 95 % /258/.

genschaften wie das Rohmaterial der 2. VR. Während der Kohlenstoffgehalt leicht oberhalb des EN-Durchschnitts liegt, ist der additiv ermittelte Sauerstoffgehalt unterhalb des Durchschnitts angesiedelt, was auch den etwas geringen Heizwert des Spanmaterials erklärt. Die Gegenüberstellung der DIN*plus*-Anforderungen mit den Rohstoffanalysedaten zeigt, dass vor allem bei der 1. VR die Einhaltung der Brennstoffanforderungen hinsichtlich des Asche- und Stickstoffgehalts im Grenzbereich kritisch sind und nur unter Einbezug der Messabweichungen der Analysewerte (Kapitel 4.4) toleriert werden können.

Anhand der beiden Spanproben zur Rohstoffcharakterisierung wird die Individualität des Naturrohstoffes Holz deutlich, das trotz vergleichbarer Bezugsquelle unterschiedliche Rohstoffparameter besitzt. Diese können sich zwar ähneln, unterscheiden sich aber im Detail und werden u. a. durch die individuellen Aufwuchsbedingungen, die verschiedenen Verfahren des Holzeinschlages, der Holzaufbereitung oder / und -verarbeitung sowie der Lagerkonditionen (Lagerzeit etc.) bestimmt (Kapitel 3.1). Unter Einbezug von Tabelle 2-4 wird aber auch deutlich, dass natürlich gewachsene und entsprechend ihrer Herkunftsspezifizierung prinzipiell zulässige Rohhölzer, teilweise nicht die Brennstoffanforderungen für eine Premiumpelletproduktion erfüllen. Limitierend wirken z. B. zu hohe Chlor- oder Stickstoffgehalte des Rohholzes.

Die Elementaranalyse der PHM zeigt (Anhang, Tabelle A-7), dass ihre Zusammensetzung in Bezug auf die Hauptelemente (C, H, O, N, S, Cl) relativ homogen ist und eine ähnliche Verteilung wie die des Spanmaterials aufweist. Lediglich Roggenmehl fällt mit überdurchschnittlichen Gehalten an Stickstoff (1,83 %) und Schwefel (0,14 %) auf. Der Aschegehalt der PHM liegt zwischen 0,09 % für Maisstärke und 1,45 % bei Roggenmehl; der Heizwert der PHM schwankt zwischen 15,8 bis 17,1 MJ/kg und liegt damit unterhalb von dem des Spanmaterials (Tabelle 5-1). Im Vergleich zu den Brennstoffanforderungen der DIN*plus* über- bzw. unterschreiten die reinen PHM somit die Grenzwerte teilweise klar. Insbesondere Roggenmehl zeigt deutliche Grenzwertüberschreitungen, deren Relevanz nachfolgend geprüft wird.

5.3 Pelletierbarkeit des Materials und Brennstofffestigkeit

Eine erfolgreiche Holzpelletproduktion bzw. eine hohe Pelletqualität wird neben den verfügbaren Einsatzstoffen und deren Materialeigenschaften von den Standortrahmenbedingungen und der Funktionsfähigkeit der technischen Anlagenkomponenten im Pelletwerk beeinflusst (Kapitel 2 und 3). Die nachfolgenden Untersuchungen konzentrieren sich nun auf den Einfluss der PHM-Zugabe und Pressgutkonditionierung mit und ohne Dampfzugabe auf die Pelletierbarkeit des Materials und die Brennstofffestigkeit der Pellets. Die Brennstofffestigkeit wird nach DIN EN 15210-1 durch die mechanische Festigkeit beschrieben und anhand von Abriebtests gemessen (Anhang, Tabelle A-3). Ob und wie die Brennstofffestigkeit während der Pelletierung von den verschiedenen Produktionsparametern beeinflusst wird, wird durch die Analyse der Spantemperatur und des Spanwassergehalts, der Presstemperatur sowie der Pellettemperatur untersucht (Kapitel 4.3.2). Die Relevanz dieser Parameter und deren Effekte auf die Brennstofffestigkeit und /oder die Pelletierbarkeit des Pressguts wird anschließend diskutiert.

Teilweise sind bereits optisch unterschiedliche Brennstofffestigkeiten erkennbar, wie beispielsweise Abb. 5-2 verdeutlicht. Die glatte glänzende Oberflächenbeschaffenheit der Holzpellets mit 1,5 % Kartoffelstärke, deren homogene Farbschattierung, die durchschnittlich deutlich größere Pelletlänge und der geringe Feinanteil in der Probe geben im Vergleich zu der eher bröcklichen, kurzen Gestalt der Pellets ohne PHM den Hinweis, dass es sich hierbei um eine Brennstoffcharge mit höherer Festigkeit handelt. Die drei Proben in der unteren Bildhälfte lassen dagegen optisch kaum eine Unterscheidung zu. Deshalb ist es für Endkunden und anderen Branchenakteuren allein anhand einer optischen Begutachtung häufig nicht möglich einzuschätzen, ob Pellets eine ausreichende Festigkeit besitzen. Ebenso ist optisch nicht feststellbar, welches PHM bei der Pelletierung dem Brennstoff in welcher Dosis beigelegt wurde.



(a) ohne PHM



(b) Maisstärke 0,5%



(c) Kartoffelstärke 1,5%



(d) Weizenstärke 1,5%



(e) Roggenmehl 1,5%

(f) spezial Quellstärke
1,5%

Abb. 5-2: Detailaufnahmen ausgewählter Brennstoffchargen gleicher Menge der 1. VR /259/

5.3.1 Einfluss von Spantemperatur und –wassergehalt

Während der Pelletierung wird die Temperatur und der Wassergehalt des Pressguts (Späne mit oder ohne PHM) nach der Wasser- (und Dampf-)konditionierung erfasst und dokumentiert (Anhang, Tabelle A-9). Aufgrund der hohen Konzentration des Holzanteils im Pressgut (zwischen 98 bis 100 %) werden beide Parameter von den Eigenschaften des Spanmaterials dominiert.

Die Spantemperatur wird einerseits von der Außentemperatur und der Tageszeit-abhängigen Sonnenstrahlung beeinflusst, dem die Spanmasse im Trockenspannlo sowie während des anschließenden Transports in den Pelletproduktionsprozess ausgesetzt ist. Zusätzlich wirkt die Intensität des Zerkleinerungsprozesses in der Hammermühle temperaturerhöhend /2/. Je nachdem wie aufwendig die Spanzerkleinerung ist, um mit den Sollwertanforderungen der Pelletierung zu korrespondieren, desto deutlicher fallen die Temperaturschwankungen des Materials aus (Energieeinsatz abhängig von Partikelaustragsgröße und Materialbeschaffenheit, Kapitel 3.2.2). Zusätzlich können sich die Konditionierungsmaßnahmen im Mischer auf den Wassergehalt des Pressguts auswirken, die nachfolgend untersucht werden.

Das aus dem Trockenspannlager kommende Spanmaterial muss vor dem Konditionierungsprozess einen etwas niedrigeren Wassergehalt als die Sollwerteneinstellung des Konditionierers besitzen (Kapitel 3.2.2). Der Wassergehalt des Materials wird dann im Konditionierer von der Anlage durch die automatische Wasserzufuhr entsprechend der Sollwerteingabe (11 %) eingestellt /254/. Deshalb zeigen die gemessenen Wassergehalte im Pressgut auch die Ungenauigkeit der Regelungstechnik der Anlage (Anhang, Tabelle A-9). Während ein gut homogenisiertes Pressgut

nahezu den Sollwertvorgaben entspricht, treten in der Praxis aufgrund schwankender Rohstoffeigenschaften im Pressgut (unterschiedliche Wassergehalte der Spanmasse im Trockenspannlo, Variation von Alter, Stärke und Größe der Spanpartikel etc.; Kapitel 2.2, 3.2) und / oder unzureichender Durchmischung Abweichungen auf.

5.3.1.1 1. Versuchsreihe

Während der Versuchspelletierung der 21 Brennstoffchargen liegen die Temperaturschwankungen des Spanmaterials zwischen 25,0 und 30,5°C (Mittelwert 28°C). Der Spanwassergehalt variiert zwischen 7,7 und 11,8 % über alle Spanproben, wobei der Mittelwert mit 10,8 % ziemlich gut der Sollwerteinstellung von 11 % entspricht.

Aus physikalischer Sicht wird vermutet, dass das Spanmaterial mit der höheren Ausgangstemperatur auch eine bessere Wasseraufnahmefähigkeit zeigt. Eine Sortierung der Versuchsergebnisse nach der Spantemperatur bestätigt dies in Abb. 5-3. Bis auf wenige Ausnahmen (Probe 4, 10, 18) nimmt bei dem Spanmaterial mit der höheren Ausgangstemperatur die Schwankungsbreite des Wassergehalts um den Sollwert von 11 % tendenziell ab.

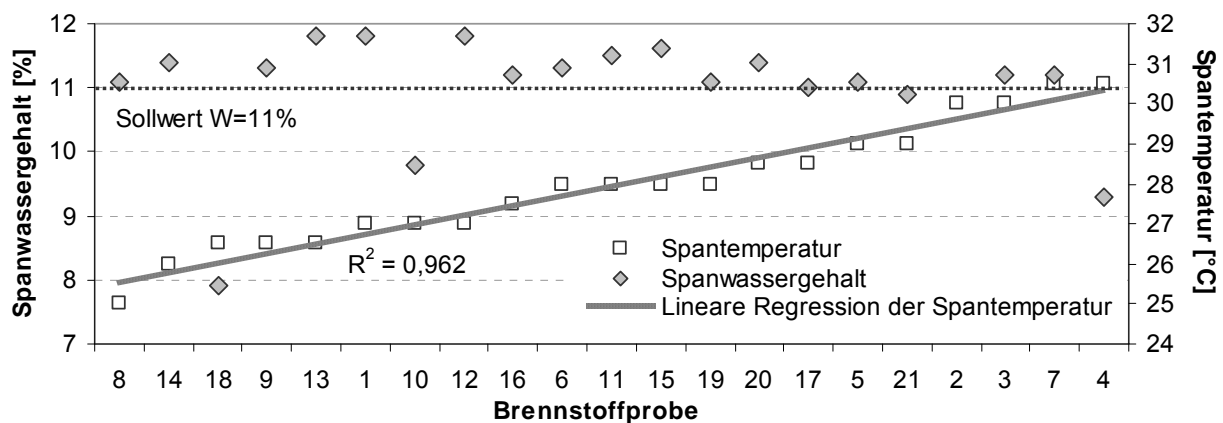


Abb. 5-3: Schwankungsbreite der Spantemperatur und des Spanwassergehalts der Brennstoffproben der 1. VR; Brennstoffproben sortiert nach steigender Spantemperatur

Somit beeinflusst die Spantemperatur die Regulierung des Wassergehalts im Pressgut. Um eine geringere Schwankungsbreite des Wassergehalts – und damit auch ein homogeneres Pressgut – sicherzustellen, könnten längere Mischprozesse im Konditionier beitragen, die mit der Ausgangstemperatur der Spanmasse korrelieren. Die Ergebnisse der 1. VR haben gezeigt, dass bei kälterem Spanmaterial längere Konditionierungsmaßnahmen zu empfehlen sind, um die Dosierung der Wasserzugabe und des Durchmischungsprozesses Feinjustieren zu können. Aufgrund des begrenzten Versuchszeitraumes konnten jedoch im Rahmen der Arbeit keine Tests dazu durchgeführt werden. Eine Alternative stellt die Konditionierung mit Dampf dar, um die Schwankungsbreite der Spantemperatur zu reduzieren, die in Kapitel 5.3.1.2 untersucht wird.

Die Art und Konzentration der PHM zeigt keinen Einfluss auf die Spantemperatur und / oder den Spanwassergehalt (Anhang, Tabelle A-9).

5.3.1.2 2. Versuchsreihe

Die Spantemperatur der Brennstoffproben der 2. VR schwankt zwischen 23,0 und 47,5°C, wobei die Versuche ohne Dampfkonditionierung mit 23,0 bis 26,5°C nur das untere Temperaturniveau der Brennstoffe der 1. VR erreichen. Die Spantemperatur der mit Dampfkonditionierten Brennstoffchargen liegt zwischen 44,0 bis 47,5°C. Der Spanwassergehalt aller Proben variiert zwischen 10,3 bis 12,7 % (Mittelwert 11,4 %). Ähnlich wie bei den Brennstoffen der 1. VR hat sich auch bei denen der 2. VR die Schwankungsbreite des Wassergehalts um den Sollwert von 11 % mit steigender Spantemperatur tendenziell reduziert. In beiden Versuchsreihen weisen die Spanproben ohne PHM die jeweils höchsten Wassergehalte der jeweiligen VR auf.

Die Ergebnisse der 2. VR zeigen somit, dass die Dampfkonditionierung einen erheblichen Einfluss auf die Spantemperatur hat, während sie den Wassergehalt des Pressguts kaum beeinflusst (Abb. 5-4). Der durchschnittliche Spanwassergehalt der Versuchschargen mit zusätzlicher Dampfkonditionierung ist sogar niedriger, als von denen die konventionell nur mittels Wasser konditioniert werden ($\bar{W}_{\text{Wasserkonditionierung}} = 11,8\%$; $\bar{W}_{\text{Dampfkonditionierung}} = 10,9\%$). Mit Ausnahme der Charge 27 (ohne PHM) zeigt die Dampfkonditionierung somit Vorteile gegenüber der reinen Wasserkonditionierung und bestätigt die Ergebnisse der 1. VR. Die Erreichung des SOLL-Wassergehalts im Konditionierer lässt sich bei Spanmaterial mit höheren Spantemperaturen besser einregulieren als bei kälterem Spanmaterial.

Deutlich erkennbar in Abb. 5-4 ist der Einfluss der PHM-Beimischung auf den Wassergehalt des Pressguts während der Dampfkonditionierung. Da sich die Bindungskräfte der Stärkekörnchen in der feucht-warmen Atmosphäre besser aktivieren lassen (Kapitel 2.3.2.1), kommt es offensichtlich bereits im Konditionierer zu Zellstrukturveränderungen der PHM mit denen eine Wassereinbindung im Material einhergeht. Geht man davon aus, dass durch die reine Wasserzumischung im Konditionierer der Spanwassergehalt der Chargen 28 bis 31 ein ähnliches Niveau wie die Brennstoffproben 23 bis 26 erreicht hat, wird der Wassergehalt der Dampfkonditionierten Chargen durch den PHM-Einsatz um durchschnittlich 0,7 % gesenkt. Tatsächlich ist die Wassereinbindung zur Stärkequellung wahrscheinlich sogar noch höher, da der Vergleich der beiden Proben ohne PHM-Zugabe gezeigt hat, dass sich der Wassergehalt des Pressguts um etwa 0,5 % durch die Dampfkonditionierung steigert. Ein Einfluss der PHM-Art auf die Spantemperatur und den Wassergehalt kann aber auch während der 2. VR nicht festgestellt werden.

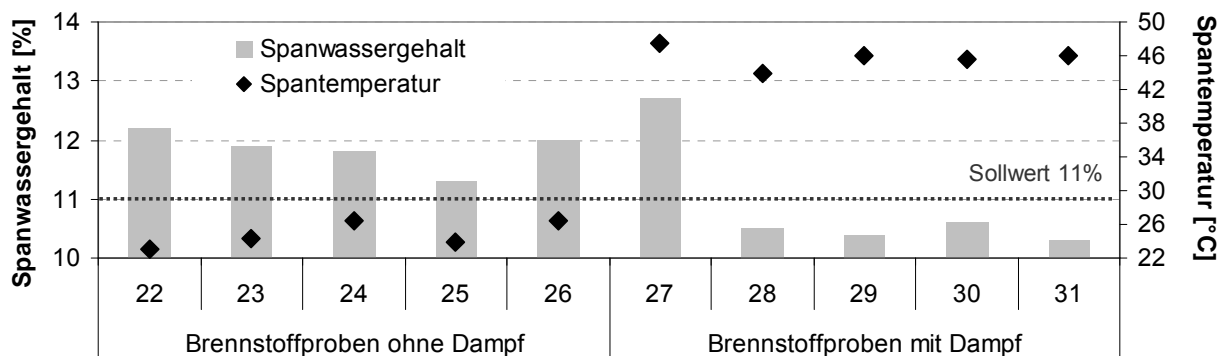


Abb. 5-4: Spantemperatur und Spanwassergehalts der Brennstoffproben der 2. VR

5.3.2 Einfluss der Presstemperatur

Die Kollertemperatur ist ein Maß für die Pelletierbarkeit der Einsatzstoffe /255/. Sie wird – unabhängig von den technischen Gegebenheiten – vermutlich von der Temperatur und dem Wassergehalt des Pressguts vor der Pelletierung (Spantemperatur und -wassergehalt) sowie den verwendeten PHM beeinflusst. Bei der nachfolgenden Auswertung der Untersuchungsergebnisse wird die Relevanz dieser Parameter geprüft.

Das Temperaturniveau, im Zentrum der Kollerachsen gemessen, liegt üblicher Weise zwischen 100 bis 130°C /178/. Je weiter entfernt die Temperaturmessung von dem Kraftzentrum stattfindet (Anordnung des Temperaturfühlers in der Kollerachse), desto niedriger ist die Temperatur. Unabhängig davon, erfährt das Pressgut während der Pelletierung eine (weitere) Temperatursteigerung durch die Reibungswärmefreisetzung bei der Pressung des Materials durch die Matrize.

Einsatzstoffe, die gut schmier- bzw. gleitfähig sind, verursachen beim Pressen geringere Widerstände (Reibung) und damit auch einen geringeren Temperaturanstieg während des Pelletierprozesses als ein Pressgut, das sich nur schlecht pelletieren lässt; d. h., der Energiebedarf zum Pressen (Antriebsleistung), der Materialverschleiß an Matrize und Kollern sowie der Instandhaltungsaufwand und der technische Kühlungsbedarf der Presse könnte reduziert werden. Da zur Aktivierung der Bindemittel im Pressgut bei den meisten PHM jedoch ein Temperaturniveau

oberhalb von 50°C notwendig ist (Kapitel 2.3.2.1), ist eine zu starke Abkühlung der Presse auch nicht gewünscht.

Zunächst wird nun untersucht, ob ein Zusammenhang des Wassergehalts des Pressguts vor der Pelletierung und der Temperaturerhöhung des Pressguts in der Presse besteht, da davon auszugehen ist, dass die Wärmeübertragung auf wasserreiches Material höher ist (aufgrund der guten Wärmeleitfähigkeit von Wasser). Mit dem „Abtransport der Wärme“ durch das Pressgut wird vermutlich eine Kühlung der Presskomponenten erreicht und die Temperatur in den Kollerachsen sinkt. Weiterhin wird der Einfluss der unterschiedlichen PHM-Arten und Dosierungen auf die Presstemperatur bzw. auf die Höhe des Temperaturanstieges analysiert.

5.3.2.1 1. Versuchsreihe

Die in Kollerachsnähe gemessene Presstemperatur von 17 der 21 Brennstoffchargen der 1. VR liegt zwischen 60 und 72°C (Mittelwert 63°C). Die Temperaturerhöhung der Spantemperatur zur Presstemperatur liegt bei durchschnittlich 34 K (Schwankungsbreite 32 bis 42 K, vgl. Anhang, Tabelle A-9). Bei der Pelletierung der Brennstoffcharge 10 mit 0,5 % Kartoffelstärke treten in der Presse kurzzeitig so hohe Temperaturen auf, dass die automatische Kühlung der Koller nicht mehr ausreicht und die Versuchsreihe kurzzeitig unterbrochen werden muss.

Neben der Brennstoffcharge 10 sind bei drei weiteren Chargen (Probe 2, 4 und 18) mit Spanwassergehalten unterhalb 10 % Probleme bei der Messung der Presstemperatur aufgetreten, deren Ursache sich während des Versuchsprogramm nicht vollständig klären lies. Da neben dem Spanwassergehalt auch andere Prozessparameter der Chargen deutliche Abweichungen gegenüber den anderen 17 Proben zeigen, werden sie nicht weiter in die nachfolgende Analyse einbezogen. Beim Einsatz der thermisch modifizierten Stärke werden mit 70°C von allen untersuchten PHM die durchschnittlich höchsten Presstemperaturen gemessen (Charge 19 bis 21).

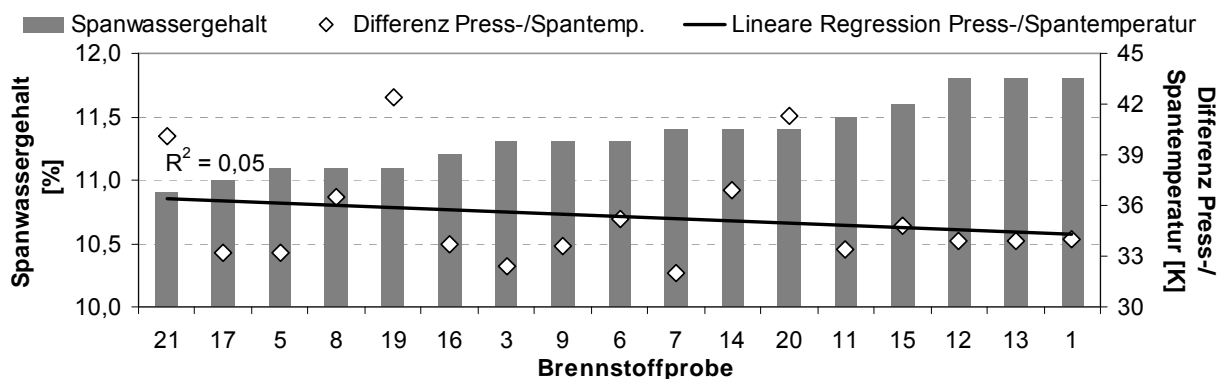


Abb. 5-5: Schwankungsbreite des Spanwassergehalts und der Temperaturerhöhung des Pressguts während der Pelletierung; Brennstoffproben sortiert nach steigendem Spanwassergehalt

Aus den Einzelergebnissen der Versuchspelletierung im Anhang, Tabelle A-9 ist nicht erkennbar, ob der Temperaturanstieg in der Presse mit dem Spanwassergehalt oder dem PHM-Einsatz korreliert. Betrachtet man die lineare Regression der Temperaturdifferenz in Abb. 5-5, ist ein schwacher Zusammenhang zwischen sinkendem Spanwassergehalt bei steigender Presstemperatur erkennbar. Allerdings scheinen andere Prozessparameter einen dominanteren Einfluss auf die Temperaturerhöhung des Pressguts bzw. der Presse zu haben, als der Spanwassergehalt. Die Brennstoffchargen mit den vergleichsweise hohen Differenztemperaturen können wiederum alle auf die mit Quellstärke verpressten Pelletproben 19, 20 und 21 zurückgeführt werden; womit sich ein Einfluss der PHM-Art auf die Temperaturerhöhung andeutet.

Deshalb zeigt Abb. 5-6 grafisch die Auswertung der Temperaturdifferenz des Span- und Pressguts für die verschiedenen PHM und Dosierungen der Versuchs Brennstoffe. Darin ist ein eindeutiger Trend zu sinkenden Temperaturdifferenzen bei steigendem PHM-Einsatz sichtbar. Bei den Versuchen mit 0,5 % PHM-Einsatz (teilweise auch bei 1,0 %) ist jedoch im Vergleich zur

Brennstoffcharge ohne PHM ein Temperaturanstieg aufgetreten (Anhang, Tabelle A-9). Dieser Effekt kann einerseits auf die niedrige Spantemperatur der Brennstoffprobe ohne PHM zurückgeführt werden; da es sich bei diesen Pellets jeweils um die erste Charge der Versuchsreihe handelt, kann es sein, dass die Pelletanlage eventuell noch nicht vollständig aufgewärmt / eingefahren war. Andererseits hat der Versuch mit 0,5 % Kartoffelstärke gezeigt, dass durch die verbesserte Pelletierbarkeit des Materials (aufgrund des PHM-Einsatzes) ein wesentlich höherer Pressgutdurchsatz möglich ist. Durch den erhöhten Massenstrom in der Presse steigt die Temperatur der Koller (schnellere Rotationsbewegung bei konstanter Antriebsleistung) und die des Pressguts. Parallel dazu sinkt die Temperaturdifferenz des Span- und Pressguts bei nahezu allen Chargen bei einem PHM-Einsatz $\geq 1\%$ sogar unterhalb des Temperaturniveaus der Referenzcharge ohne PHM-Einsatz (Abb. 5-6). Somit zeigt sich, dass der Effekt der PHM-Einsatzmenge auf die Temperaturerhöhung der Presse begrenzt ist und bei 4 der 5 Stärken sich spätestens bei einer PHM-Dosierung von 2 % ein ähnliches Temperaturniveau einstellt. Eine Ausnahme stellen die Versuche mit der kaltquellenden Stärke²⁹ dar, zu denen sich hier keine allgemeingültigen Aussagen ableiten lassen. Aufgrund einer zeitlichen Unterbrechung der Versuchsreihe (Kapitel 4.4) kann das generell höhere Temperaturniveau der Brennstoffchargen mit Quellstärke gegenüber den nativen Stärken entweder auf dessen höhere Reaktionsfähigkeit zurückgeführt und / oder durch eine Variation der Spanqualität während der längeren Lagerzeit verursacht werden. Das Absinken der Presstemperaturen mit steigender PHM-Konzentration ist jedoch auch beim Einsatz der Quellstärke sichtbar. Das Pelletierverhalten des Pressguts mit Quellstärke verbessert sich im Vergleich zur Referenzbrennstoffcharge ohne PHM-Einsatz auf jeden Fall. Unabhängig von den Temperaturdifferenzen zeigen von allen getesteten PHM die Versuche mit Kartoffelstärke während der Pelletierung die größten Schmiereffekte – und damit die beste Pelletierbarkeit. Bei Weizen- und Roggenmehl können ähnliche Wirkungseffekte beobachtet werden.

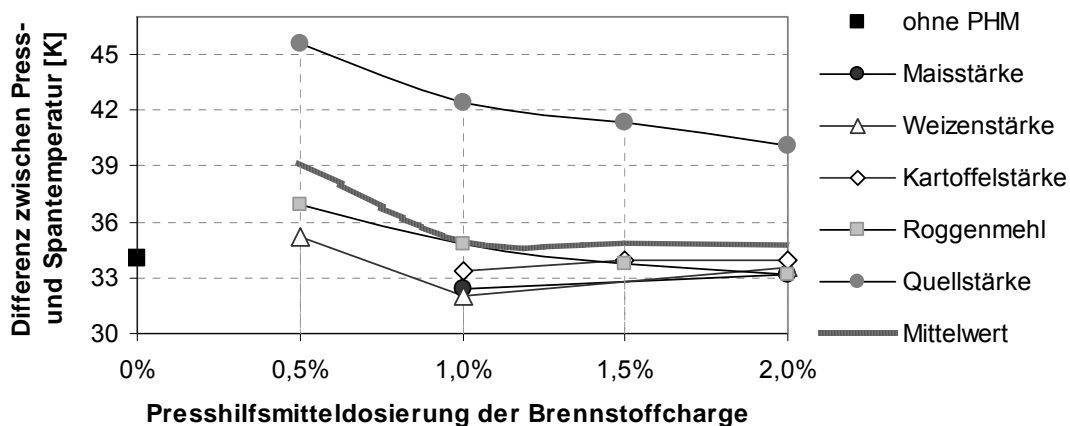


Abb. 5-6: Temperaturdifferenz des Pressguts zwischen Konditionierung und Pelletierung

Für „ordentliche“ Pelletlängen (nach DINplus bis 3 cm, Tabelle 4-1) mit einer möglichst geringen Abriebfestigkeit ist es notwendig, das Verhältnis zwischen der Pelletmantel- und der Pelletendstückfläche zu optimieren; d. h. nicht so viele kurze, aber auch nicht zu lange Pellets produzieren (Kapitel 3.4.2). Aufgrund der rauen Oberflächenbeschaffenheit der Pelletendstücke verursachen sie im Vergleich zur geglätteten Oberfläche des Pelletmantels besonders hohe Abriebswerte (Maß der Brennstofffestigkeit, vgl. GLOSSAR). Deshalb muss das Pressgut auch mit ausreichend Druck in dem Presskanal der Matrize kompaktiert werden, bevor der Pelletstrang die Presse verlässt. Weiterhin beeinflusst die Verweilzeit des wachsenden Pressgutstranges in der heißen Matrize die Ausschöpfung des Bindungspotenzials des holzeigenen Lignins bzw. der PHM (Kapitel 2.3.1). Deshalb ist eine Maximierung des Pressgutdurchsatzes mit Hilfe von Additiven nur bedingt sinnvoll, auch wenn dadurch der Energieaufwand des Kollerantriebs gesenkt werden kann (Reduktion der Antriebskraft). Somit muss eine Balance gefunden werden zwi-

²⁹ thermisch modifizierte Maisstärke, hier auch als (Spezial-)Quellstärke bezeichnet

schen der möglichen Steigerung des Massenstromdurchsatzes und einem guten Flächenverhältnis zwischen Pelletmantel und Endstücken.

5.3.2.2 2. Versuchsreihe

Bei den Brennstoffchargen der 2. VR liegt die Spannbreite der Presstemperatur zwischen 51 und 77°C (Mittelwert 65°C). Die Temperaturerhöhung des Pressguts zwischen Konditionierer und Presse liegt bei durchschnittlich 30 K, wobei die mit Dampf konditionierten Brennstoffchargen einen Mittelwert von nur 12 K aufweisen, während die ohne Dampf konditionierten Chargen im Durchschnitt 48 K erreichen (Anhang, Tabelle A-9).

Im Vergleich zur 1. VR (Mittelwert 34 K) liegt bei den konventionell konditionierten Chargen (ohne Dampf) der 2. VR somit eine deutlich höhere Temperaturdifferenz zwischen der Span- und Presstemperatur vor. Dies kann auf veränderte Spanguteigenschaften zurückgeführt werden, da die PHM und technischen Anlagenparameter nicht verändert wurden. Trotz gleichem Spanlieferanten und gleicher Holzart unterscheiden sich die Späne offensichtlich hinsichtlich ihrer Eignung zur Konditionierung. Gründe dafür könnten z. B. unterschiedliche Lagerzeiten oder -konditionen beim Spanlieferanten sein (Kapitel 2.2).

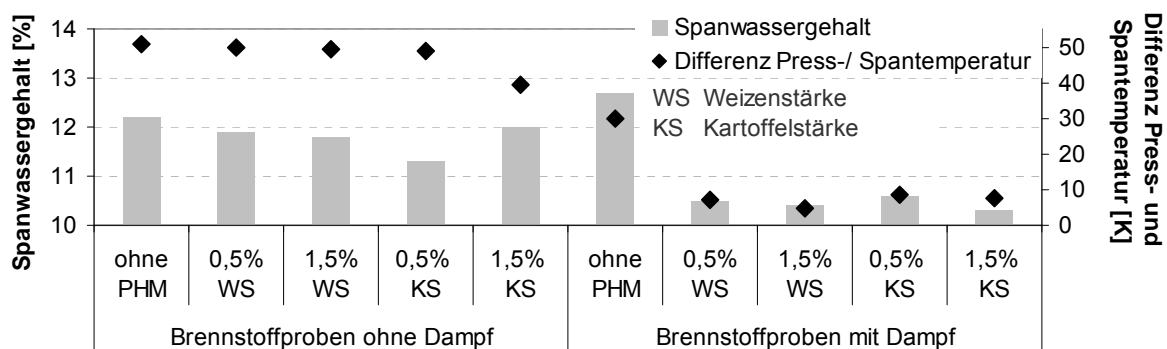


Abb. 5-7: Schwankungsbreite des Spanwassergehalts und der Temperaturerhöhung des Pressguts während der Pelletierung

Aus den Ergebnissen der 2. VR ist in Abb. 5-7 erkennbar, dass die Dampfkonditionierung zu einer erheblichen Absenkung des Temperaturniveaus der Presse während der Pelletierung und damit zu einem reduzierten Kühlbedarf (Energieeinsparungen) beiträgt. Bei der Charge mit Dampfkonditionierung, aber ohne PHM-Einsatz tritt von allen Dampf-konditionierten Brennstoffen die höchste Differenz zwischen der Press- und Spantemperatur auf. Dies kann ein Anzeichen dafür sein, dass die Dampfkonditionierung des Pressguts tatsächlich nur in Kombination mit dem PHM-Einsatz zu einer deutlichen Absenkung der Presstemperatur beiträgt. Ohne den PHM-Einsatz wird durch die Dampfzugabe zwar die Oberflächenspannung / Widerstandsfähigkeit der Späne reduziert und dadurch die Pelletierbarkeit des Materials verbessert (Kapitel 3.2.2), allerdings fallen die Gleit- und Schmiereffekte im Vergleich zu den Chargen mit PHM-Einsatz deutlich geringer aus.

Ausgehend davon wird vermutet, dass die Möglichkeiten einer Optimierung der Bindungsausprägung durch die Dampfkonditionierung begrenzt sind. Diese Aussage resultiert aus Abb. 5-8, in der eine deutliche Abnahme der Temperaturdifferenz beim Einsatz von 0,5 % Kartoffel- oder Weizenstärke sichtbar wird, während beim Einsatz von 1,5 % PHM nur geringfügig weitere Effekte zu beobachten sind.

Für die hier verwendete Weizenstärke wird herstellerseitig eine Verkleisterungstemperatur zwischen 50 und 70°C angegeben (Tabelle 2-8). Während der Dampftemperierung im Konditionierer liegen die Spantemperaturen allerdings nur zwischen 44 und 46°C. Die höchste gemessene Presstemperatur bei den Weizenstärkeversuchen ist 51°C (bei Kartoffelstärkeversuchen 54°C). Damit wird das notwendige Temperaturniveau zur Verkleisterung der PHM vor der Pelletierung wahrscheinlich nur kurzzeitig erreicht. Dennoch haben die Versuche des mit Dampf konditio-

nierten Pressguts gezeigt, dass dies ausreicht, um eine verbesserte Schmier- und Gleitfähigkeit des Materials zu erreichen. Nicht eindeutig bestimmbar ist, welchen Anteil der Effekt der verbesserten Pelletierfähigkeit des Pressgutes auf das Spanmaterial zurückzuführen ist (aufgrund der geringen Versuchschargen ohne PHM-Zusatz).

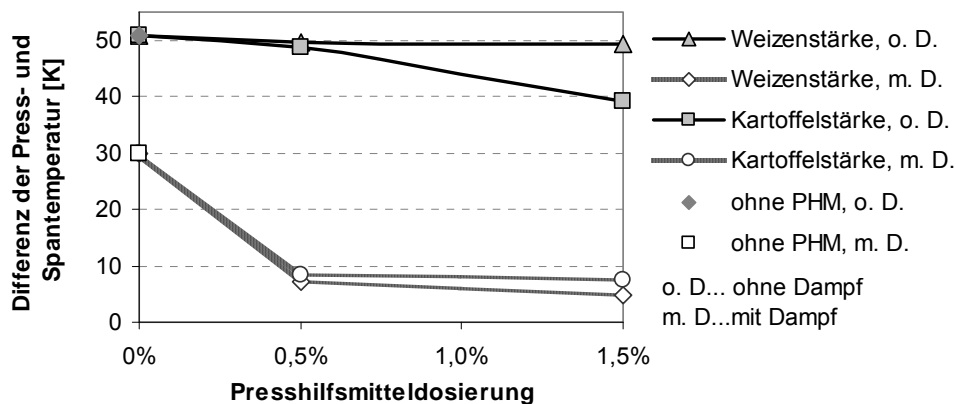


Abb. 5-8: Temperaturdifferenz des Pressguts mit unterschiedlichem PHM-Einsatz und Konditionierungsmaßnahmen zwischen Konditionierung und Pelletierung

Abb. 5-8 bestätigt außerdem den generellen Zusammenhang von sinkenden Presstemperaturen bei steigendem PHM-Einsatz (vgl. 1. VR). Dies wird besonders gut bei den Brennstoffchargen mit Kartoffelstärke mit und ohne Dampfkonditionierung deutlich. Demgegenüber fällt bei den Versuchen mit Weizenstärke der Trend schwächer aus.

5.3.3 Einfluss von Pellettemperatur und -wassergehalt

Die Pellettemperatur am Ende der Produktionslinie ist von der Presstemperatur, der Verweildauer der Pellets im Kühler und von der Außentemperatur abhängig, da die Pellets im Gegenstromkühler mittels Außenluft gekühlt werden /2/.

Die technische Kühlung der Pellets ist notwendig, um das – unter der Wärmeeinwirkung während der Pelletierung – erweichte holzeigene Lignin wieder zu verfestigen sowie die mit Wasser gelösten PHM (Quell-/Kleistermasse) zwischen den Spänen zu trocknen und damit die Feststoffbrückenbindungen zu stabilisieren. Weiterhin werden Wasserdampfbläschen die während der Pelletierung unter dem Pressdruck im Pellet eingeschlossen werden, kontrolliert kondensiert / entspannt, um Spannungsrissen in der Pelletoberfläche vorzubeugen (Kapitel 3.2.3). Die technische Kühlung verleiht somit den Presslingen die notwendige Formfestigkeit. Zur Quantifizierung der mechanischen Brennstofffestigkeit wird der Abriebtest herangezogen.

In Ergänzung der Diskussion zur Pellettemperatur wird zusätzlich der Einfluss des Wassergehalts der Pellets am Ende der Produktionslinie auf die Brennstofffestigkeit untersucht.

5.3.3.1 1. Versuchsreihe

Die Pellettemperatur aller Brennstoffproben liegt zwischen 22 und 35°C (Mittelwert 30°C, Anhang, Tabelle A-9). Der direkt am Produktionsstandort durchgeführte Abriebtest aller Brennstoffproben schwankt zwischen 0,7 (2 % Kartoffelstärke) und 6,1 % (Pellets ohne PHM); im Durchschnitt liegt er bei 1,7 %.

Der hohe Abrieb der Pellets ohne PHM deckt sich nicht mit den Praxiserfahrungen einer industriellen Pelletproduktion und stellt deshalb für den Vergleich einen nicht ganz relevanten Referenzwert dar /2/. Durch Anpassungen der Anlagenparameter (Druck, Wassergehalt, Temperatur etc.) können auch für Pellets ohne PHM-Einsatz weitaus bessere Ergebnisse erzielt werden könnten (Kapitel 2.3.2.1, 3.2.3). Da es innerhalb der Versuchspelletierung das Ziel ist einheitliche Rahmenbedingungen für alle Brennstoffchargen bereitzustellen, wird jedoch auf eine Voreinstellung oder Nachjustierung der technischen Aggregate der Pelletanlage verzichtet /2/.

Korreliert man die Messwerte der Pellettemperatur und des Abriebs der Brennstoffchargen der 1. VR wird in der grafischen Auswertung in Abb. 5-9 die Abhängigkeit zwischen den beiden Kennwerten sichtbar. Je kühler die Pellets beim Austritt aus der Produktion sind, desto niedriger ist der Abrieb (Abb. 5-9, lineare Regression); d. h., trotz der Abweichungen bei beiden Parametern über alle Brennstoffproben hinweg, zeigt sich eine deutliche Tendenz zur Steigerung der mechanischen Brennstofffestigkeit bei sinkenden Pelletaustrittstemperaturen. Damit wird die in der Literatur beschriebene Abhängigkeit anhand der Praxisversuche bestätigt (Kapitel 3.2.3).

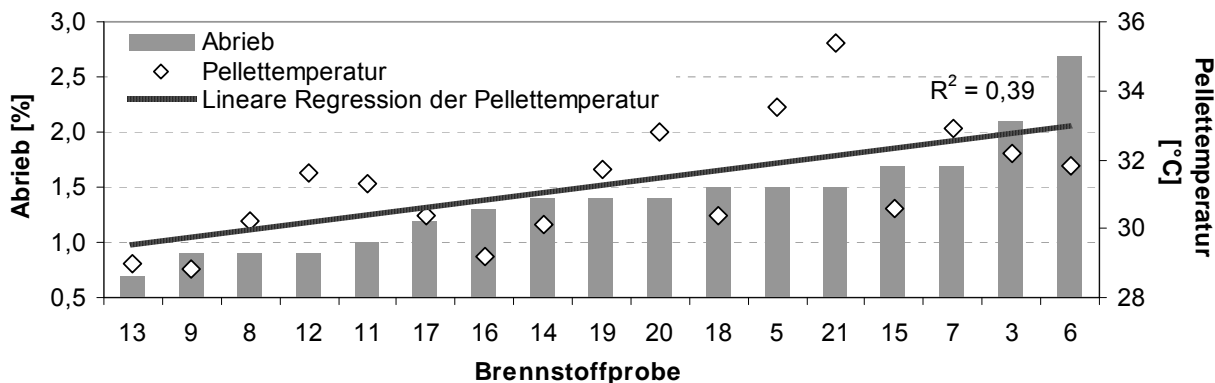


Abb. 5-9: Schwankungsbreite der Pellettemperatur und des Abriebses der 1. VR, Brennstoffproben sortiert nach sinkender mechanischer Festigkeit (steigendem Abrieb)

Ungeklärt bleibt im Rahmen der Brennstoffversuche über welchen Zeitraum die Abkühlung der Pellets nach der Pressung erfolgen sollte. Bisher bestehen unterschiedliche Erfahrungen, wie und ob eine schonende Auskühlung im Vergleich zur „zügigen Abschreckung“ die Brennstofffestigkeit beeinflusst (Kapitel 3.2.3).

Abb. 5-10 zeigt den Abriebswert der Pellets entsprechend der eingesetzten PHM und deren Dosierung. Demnach weisen von allen eingesetzten PHM Pellets mit Kartoffelstärke die niedrigsten Abriebswerte auf (Mittelwert 0,9 %) und damit durchschnittlich die höchste mechanische Festigkeit. Ebenfalls geringe Abriebswerte zeigen die Pellets mit Roggenmehl (Mittelwert 1,4 %) und der thermisch modifizierte Stärke (Mittelwert 1,5 %); während die durchschnittlichen Ergebnisse der Pellets mit Weizen- und Maisstärke bei 1,6 bzw. 1,8 % liegen.

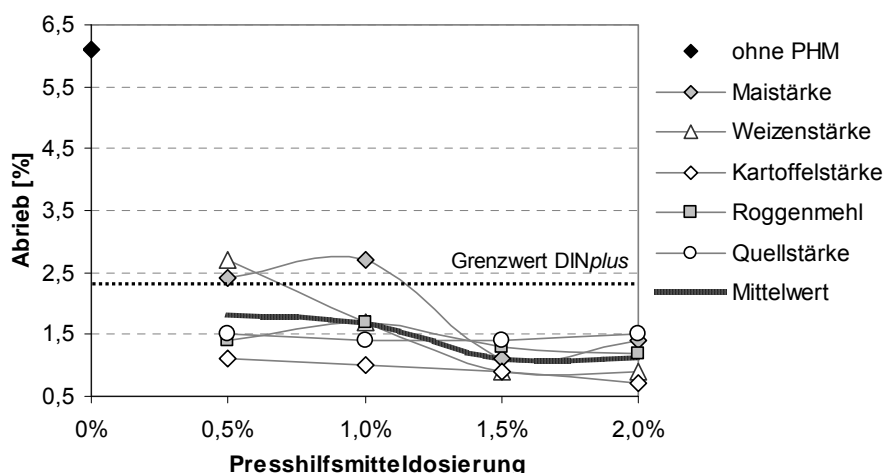


Abb. 5-10: Abrieb aller Versuchschargen beim Einsatz unterschiedlicher PHM-Arten und Dosierungen, einschließlich Mittelwert der Brennstoffchargen mit PHM-Einsatz

Bei nahezu allen Brennstoffchargen nimmt mit einer zunehmenden PHM-Dosierung die Abriebfestigkeit des Brennstoffs zu. Bei 4 von 5 PHM stagniert dieser Trend jedoch beim Einsatz von 1,5 % PHM oder der Abriebswert ist bei 2 % sogar leicht höher als beim Einsatz von 1,5 % PHM. Eine Auswertung der Mittelwerte über alle 5 PHM bestätigt die Stagnation der Abriebfes-

tigkeit trotz steigender PHM-Dosierung bei 1,5 % (Abb. 5-10). Demnach ist vermutlich die Erhöhung der Abriebfestigkeit durch den PHM-Einsatz je nach PHM-Art und Dosierung begrenzt.

Ebenfalls in Abb. 5-10 erkennbar ist, dass vier Versuchsbrennstoffchargen (Pellets ohne PHM, Pellets mit 0,5 % Weizenstärke und Pellets mit 0,5 bzw. 1,5 % Maisstärke) die DINplus-Anforderungen von maximal 2,3 % nicht erfüllen (Anhang, Tabelle A-9).

In Abb. 5-11 ist der Abriebsgehalt der Versuchsbrennstoffe dem Brennstoffwassergehalt gegenübergestellt, um die Korrelation der beiden Brennstoffparameter zu prüfen. Dieser bekannte Zusammenhang (Kapitel 3.2) kann anhand der vorliegenden Analysedaten bestätigt werden, wobei der Brennstoffwassergehalt über alle Versuchschargen mit bis zu 2,2 % stark schwankt (Bestimmtheitsmaß $R^2=0,16$). Allerdings ist über alle Versuchschargen die Schwankungsbreite des Brennstoffwassergehalts der Pellets wesentlich geringer als die des Spanwassergehalts vor der Pressgutkonditionierung mit 4,1 % (Anhang, Tabelle A-9). Somit bestätigt sich der Erfolg der Konditionierungsmaßnahmen hinsichtlich einer Homogenisierung des Pressguts. Keine der 21 Versuchschargen überschreitet den maximal zulässigen Brennstoffwassergehalt für Premiumpellets von 10 % (Anhang, Tabelle A-3).

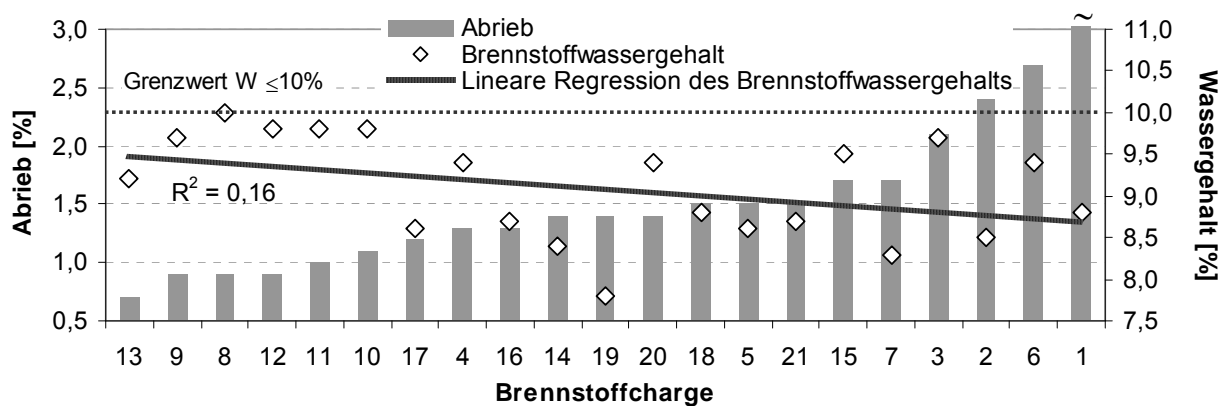


Abb. 5-11: Schwankungsbreite des Brennstoffwassergehalts und des Abriebs der Versuchschargen der 1. VR, Brennstoffproben sortiert nach steigendem Abrieb

5.3.3.2 2. Versuchsreihe

Nachdem in Kapitel 5.3.3.1 der Einfluss des PHM-Einsatzes und der technischen Kühlung auf die Abriebfestigkeit der Pellets nachgewiesen wurde, wird nun der Einfluss der Konditionierungsmaßnahmen untersucht.

Die Pellettemperatur der Brennstoffproben der 2. VR schwankt zwischen 22 und 32°C und beträgt im Mittel 26°C. Während die große Schwankungsbreite der Pellettemperatur ausschließlich von den stärker variierenden Dampf-konditionierten Brennstoffchargen verursacht wird, beträgt die Abweichung von der durchschnittlichen Pellettemperatur bei beiden Konditionierungsmaßnahmen (mit / ohne Dampf) nur +/- 1 K (Anhang, Tabelle A-9). Gegenüber der 1. VR liegen die Pellettemperaturen der Brennstoffchargen der 2. VR im Mittel etwa 4 K niedriger.

Die Ergebnisse des Abriebtests bei den Brennstoffproben der 2. VR zeigen konstant hohe Brennstofffestigkeiten mit Abriebswerten zwischen 0,6 % (Pellets ohne PHM und Dampfkonditionierung) und 1,9 % (Pellets mit 1,5 % Kartoffelstärke und Dampfkonditionierung). Der Mittelwert aller Chargen liegt bei 1,2 %. Beim Vergleich der nicht Dampf-konditionierten Brennstoffchargen der 2. VR mit denen der 1. VR zeigt sich, dass sich der durchschnittliche Abrieb von 1,7 auf 1,4 % reduziert hat. Hier wird erneut der Einfluss des Holzrohmaterials auf die Pelletkennwerte deutlich, das – trotz gleichen PHM-Einsätzen und unveränderten technischen Anlageneinstellungen – unterschiedliche Brennstoffeigenschaften verursachen kann.

Aus Abb. 5-12 kann geschlossen werden, dass die Konditionierungsart des Pressguts mit oder ohne Dampf für die Pellettemperatur nach der technischen Kühlung der Presslinge schein-

bar keine Bedeutung hat.

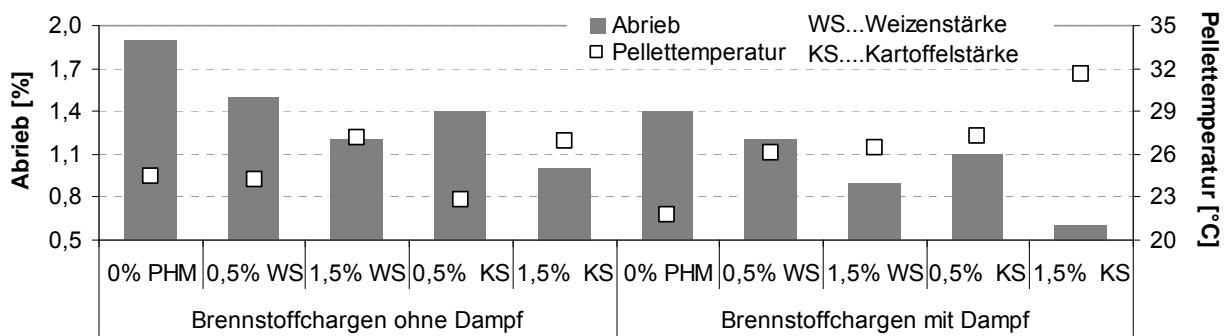


Abb. 5-12: Pellettemperatur und Abrieb der Chargen der 2. VR (mit und ohne Dampfconditionierung)

Die Korrelation der sinkenden Pellettemperatur verbunden mit einer verbesserten Abriebfestigkeit kann für die 2. VR nicht nachgewiesen werden. Bei der separaten Betrachtung der mit Dampf konditionierten Brennstoffchargen zeigt sich tendenziell sogar ein umgekehrter Trend (Abb. 5-12). Allerdings ist hier eine konstante Absenkung der Abriebswerte bei steigendem PHM-Einsatz erkennbar; d. h., die PHM-Art und Dosierung hat offensichtlich einen größeren Einfluss als die Konditionierungsmaßnahme und die Pellettemperatur auf die Abriebfestigkeit.

Im Gegensatz zur 1. VR entsprechen die Abriebwerte aller Brennstoffchargen der 2. VR den DINplus-Anforderungen von maximal 2,3 %. Unabhängig vom eingesetzten PHM ist die Abriebfestigkeit der Pellets mit Dampfconditionierung gegenüber der Vergleichscharge ohne Dampfconditionierung höher. Dies gilt auch für die beiden Brennstoffproben ohne PHM, bei denen beispielsweise der Abrieb 1,9 % ohne Dampfconditionierung und 1,4 % mit Dampfconditionierung ist (Anhang, Tabelle A-9). Dies kann ein Anzeichen für eine verbesserte Aktivierung der Bindungskräfte des holzeigenen Lignins durch die Dampfconditionierung sein (höhere Geschwindigkeit / Flexibilität der Partikel begünstigt den Eingang von formschlüssigen Bindungen, Kapitel 2.3.2). Offensichtlich können bei der Pressgutconditionierung ohne Dampf die holzeigenen Bindungskräfte nur eingeschränkt aktiviert werden. Die Vortemporierung des Pressguts mit Dampf scheint somit vielversprechend zu sein; d. h., eine Absenkung der Presstemperatur ist zumindest zu einem großen Anteil auf die verbesserten Späneigenschaften als auf den PHM-Zusatz zurückzuführen.

Für die Brennstoffchargen mit PHM-Einsatz und Dampfconditionierung reicht die Temperaturerhöhung durch die Dampfzugabe aus, um mindestens vergleichbare Quell- und Verkleisterungseffekte zu erzielen, wie bei den Brennstoffchargen ohne Dampfconditionierung, aber mit einem wesentlich höheren Temperaturniveau in der Presse. Dies zeigen die nur geringfügig abweichenden Abriebswerte der Pellets mit und ohne Dampfconditionierung in Abb. 5-12. In Summe weisen die mit Dampf konditionierten Brennstoffe sogar eine um durchschnittlich 0,4 % verbesserte Abriebfestigkeit auf.

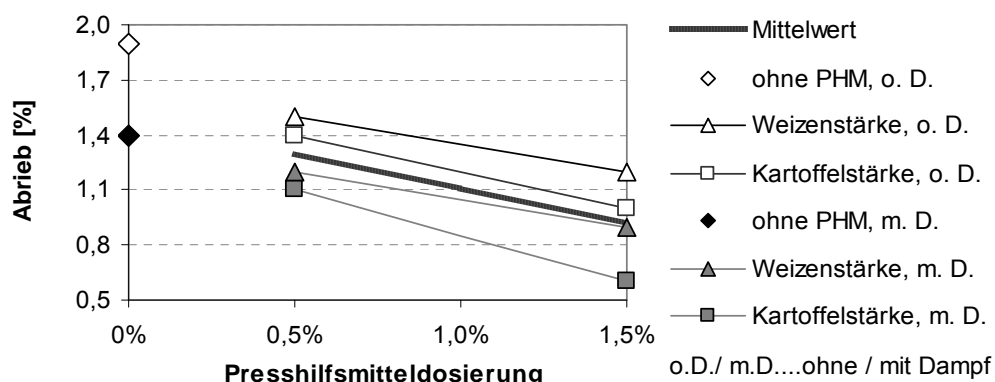


Abb. 5-13: Abrieb der Chargen der 2. VR beim Einsatz unterschiedlicher PHM-Arten und Dosierungen

Von allen eingesetzten PHM zeigen Pellets mit Kartoffelstärke erneut die höchste Abriebfestigkeit auf (Mittelwerte: 1,2 % ohne Dampf; 0,9 % mit Dampf; 0,9 % 1. VR). In Abhängigkeit der Konditionierungsmaßnahme weisen die Brennstoffchargen mit PHM-Zusatz eine durchschnittlich höhere Abriebfestigkeit auf als die Pellets ohne PHM-Einsatz auf (im Mittel 0,6 % in Bezug auf die 2. VR). Bei allen Brennstoffchargen nimmt bei der Steigerung der PHM-Dosierung bis 1,5 % die mechanische Festigkeit des Brennstoffs zu (Anhang, Tabelle A-9).

In Abb. 5-14 ist der Abrieb der Versuchsbrennstoffe dem Pelletwassergehalt gegenübergestellt. Demnach steigt die Abriebfestigkeit der Pellets mit einer Zunahme der PHM-Dosierung und unter Einbezug der Dampfkonditionierung.

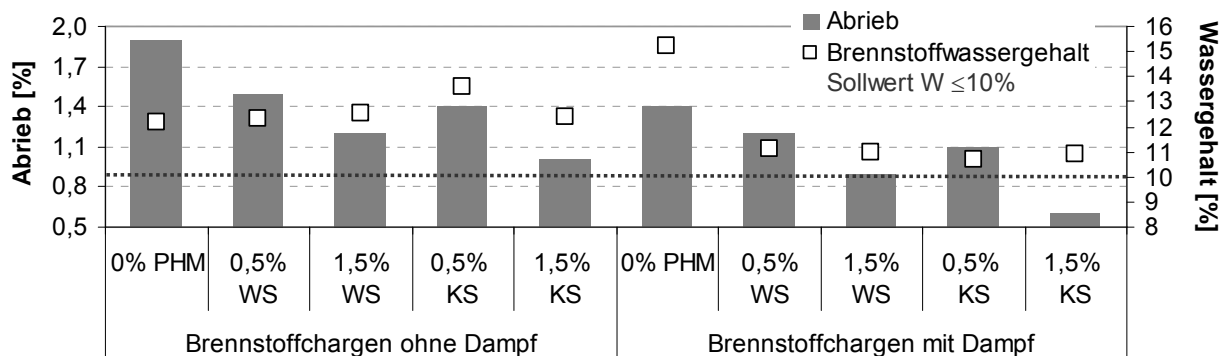


Abb. 5-14: Brennstoffwassergehalt und Abrieb der Versuchschargen der 2. VR

Die Korrelation der beiden Brennstoffparameter Pelletabrieb und -wassergehalt, die für die Brennstoffchargen der 1. VR gilt (Abb. 5-14), kann für die Chargen der 2. VR nicht festgestellt werden. Als Ursache kommen u. a. die unterschiedlichen Konditionierungsmaßnahmen (Wasser-/Dampfungabe, PHM-Art und Dosis oder eine zu geringe Anzahl an Versuchsreihen in Frage. Auch zeigen sich Zweifel an der Korrektheit der Analysewerte zum Wassergehalt, z. B. in Bezug auf die Brennstoffproben mit PHM-Zusatz und ohne Dampfkonditionierung. Die Analyse des Spanwassergehalts vor der Pressung ist mit 11,3 bis 12,2 % angegeben (Anhang, Tabelle A-9). Die Pellets nach Pressung und Abkühlen besitzen jedoch Brennstoffwassergehalte von 12,2 bis 13,6 % (Anhang, Tabelle A-8). Somit entsprechen selbst unter Einbezug der Messtoleranzen nur drei der Versuchschargen der 2. VR den Brennstoffanforderungen, da alle anderen den maximal zulässigen Grenzwert des Brennstoffwassergehaltes von 10 % übersteigen. Deshalb ist zu vermuten, dass im Fall der Versuchspelletierung die Regulierung des Spanwassergehalts und der Konditionierungsmaßnahmen des Pressguts nicht ausreichend aufeinander abgestimmt ist.

5.3.4 Fazit

Die Versuchsergebnisse zur Pelletierbarkeit des Materials und zur Brennstofffestigkeit (Kapitel 5.3) zeigen, dass die Spantemperatur des Rohmaterials einen Einfluss auf den Erfolg der automatisierten Wassergehaltsregulierung im Konditionierer der Pelletanlage hat. Dabei sind höhere Spantemperaturen günstiger, um die Schwankungsbreite zur Regulierung des Wassergehalts zu reduzieren. Die Dampfkonditionierung ist sehr gut geeignet, um die Temperatur des Rohmaterials zu erhöhen; sie beeinflusst dabei den Wassergehalt des Pressguts nur wenig. Es können keine verifizierbaren Anzeichen für die Vorteilhaftigkeit der ein oder anderen PHM-Art und Dosisierung auf die Spantemperatur oder den Spanwassergehalt des Pressguts festgestellt werden.

Der Wassergehalt des Spanmaterials und die PHM-Dosierung beeinflussen die Gleitfähigkeit des Pressguts. Sie können in einem begrenzten Maß den Massenstromdurchsatz der Anlage optimieren und zu einer Reduktion des Energieaufwandes der Pelletpresse beitragen. Tendenziell wird durch eine Erhöhung des Wasser- und Bindemiteleinsatzes die Temperatur in der Presse gesenkt, was zu einem reduzierten Verschleiß der Anlage beitragen kann.

Die Dampfkonditionierung des Pressguts trägt zur Effizienzsteigerung des Pelletierprozesses bei, da die Vortemperierung der Einsatzstoffe (Erhöhung der Pelletier-/Schmierfähigkeit des Materi-

als) vorrangig aufgrund der Dampfzugabe erreicht wird und weniger durch den Temperaturanstieg mittels Reibungswärme in der Presse. Dadurch kann der Massenstromdurchsatz des Pressguts gesteigert bzw. der Energieeinsatz zur Pelletierung gesenkt werden. Weiterhin wird auch der Materialverschleiß der Koller und Matrizen durch die reduzierten Reibungsverluste und niedrigeren Presstemperaturen gesenkt. Die Art des stärkehaltigen PHM und dessen Verkleisterungstemperatur hat einen Einfluss auf den Temperaturanstieg der Presse während der Pelletierung.

Die Temperatur der Pellets am Austritt aus der Produktion beeinflusst ihre Abriebfestigkeit. Um eine möglichst hohe Abriebfestigkeit zu erreichen, ist eine ausreichende Abkühlung des Pressguts sicherzustellen.

Zusammengefasst trägt bei der Holzpelletierung der Einsatz stärkehaltiger PHM zu einer Erhöhung der mechanischen Festigkeit des Brennstoffs bei. Durch die Verkleisterung der PHM aufgrund der Konditionierungsmaßnahmen wird ein Schmiereffekt in der Presse erreicht. Dabei beeinflusst die PHM-Art und Dosierung die Wirkungseffekte. Der Einsatz des thermisch modifizierten PHM weist keine Vorteile gegenüber den nativen Stärken auf. Die Zugabe von Kartoffelstärke als PHM hat während der Versuchspelletierung die besten Ergebnisse hinsichtlich der Pelletfestigkeit erzielt. Durch die Dampfkonditionierung des Pressguts kann sowohl die Pelletierbarkeit der Einsatzstoffe als auch die Abriebfestigkeit der Pellets weiter verbessert werden.

Die praktischen Erfahrungen der Versuchspelletierung decken sich somit mit den Literaturangaben (/141/, /224/, /254/) zur Spannbreite der Verkleisterungstemperatur stärkehaltiger Bindemittel, nachdem z. B. native Maisstärke ein eher etwas höheres Temperaturniveau als Kartoffelstärke benötigt (Tabelle 2-8).

Der Brennstoffwassergehalt der Pellets hat einen Einfluss auf die Brennstofffestigkeit, der jedoch im Bereich der Grenzwertanforderungen (um 10 %) und im Vergleich zum PHM-Einsatz nicht dominierend auf die Höhe des Abriebgehalts wirkt.

5.4 Ascheschmelzverhalten

Die typischen Feuerraumtemperaturen für Pelletkessel liegen zwischen 800 und 1 100°C (Kapitel 3.4.2.). Beispielsweise werden für Fichtenholz Sintertemperaturen zwischen 1 110 und 1 340°C sowie Erweichungstemperaturen zwischen 1 410 und 1 640°C genannt /75/, /149/, /254/. Damit liegen die kritischen Ascheerweichungstemperaturen des Pelletsanmaterials alle oberhalb der von den Herstellern angegebenen Feuerungsraumtemperaturen, so dass bei der Verbrennung von reinen Fichtenholzpellets in der Regel keine Sinterungen oder Ascheverschlackungen auftreten dürften, wie sie in Kapitel 1.1 beschrieben sind. Deshalb wird nachfolgend anhand verschiedener Bestimmungsmethoden die Gefahr der Verschlackungsneigung durch die Bemischung von stärkehaltigen PHM zur Holzpelletierung diskutiert.

5.4.1 Spurenelementanalyse

Die Elementaranalyse der Hauptelemente C, H, O, N, Cl, S der Einsatzstoffe zur Pelletierung zeigt kaum signifikante Auffälligkeiten zwischen den Versuchschargen (Kapitel 5.2). Dies bestätigt auch die Brennstoffanalyse im Anhang, Tabelle A-8. Die Holzqualität entspricht den typischen Eigenschaften von Nadelholz (in Anlehnung an EN 14961-1) und – unter Einbeziehung der Messtoleranzen – den diesbezüglichen Anforderungen der DINplus (Tabelle 5-1). Die Auswahl der PHM-Art und Einsatzmenge wird bei allen Versuchschargen normkonform gestaltet. Deshalb sollten die Pellets kein kritisches Ascheschmelzverhalten zeigen.

Um diese These belegen zu können, wird in einer erweiterten Laboranalyse auch der Gehalt an (Erd-)Alkalien und Metallen in den Rohmaterialien, im Pelletmaterial (Brennstoffanalyse) und in den Brennstoffaschen bestimmt, die einen erhöhenden oder senkenden Einfluss auf das Ascheschmelzverhalten eines biogenen Festbrennstoffs haben (Kapitel 2.2.2.3).

- **Rohstoffanalyse.** Die Elementgehalte von Mais- und Weizenstärke zeigen nach Abb. 5-15 zwar z. T. deutliche Abweichungen zum Spanmaterial; sie tendieren jedoch fast alle hin zu

einer geringeren Spurenelementbelastung. Nur Kartoffelstärke, Roggenmehl und Quellstärke weisen erhöhte Si-Gehalte im Vergleich zum Spanmaterial auf. Auffällig bei Roggenmehl sind zusätzlich die ebenfalls stark erhöhten K- und Mg-Gehalte, während die thermisch modifizierte Quellstärke einen signifikant höheren Na-Gehalt aufweist.

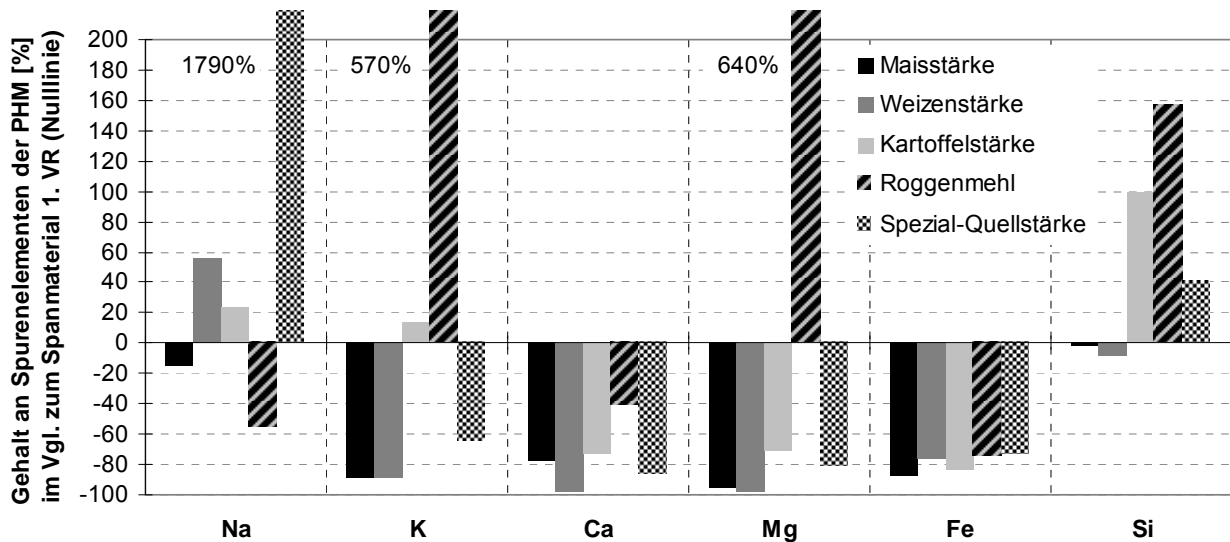


Abb. 5-15: Vergleich der Spurenelementgehalte der Presshilfsmittel (PHM) zum Spanmaterial

Erhöhte K- und Si-Anteile (tendenziell auch Na) tragen zu einer Senkung der Ascheschmelztemperatur in Biobrennstoffen bei, wogegen Ca (und wahrscheinlich auch Mg und Fe) die Ascheschmelztemperatur erhöht /66/, /103/, /152/, /245/. Im Vergleich zu den anderen PHM ist somit bei der Verwendung von Roggenmehl und Quellstärke (eventuell auch bei Kartoffelstärke) zur Holzpelletierung eher eine Senkung des Temperaturniveaus der Ascheerweichung zu vermuten, als beim Einsatz von Mais- oder Weizenstärke.

- **Brennstoffanalyse.** Trotz der z. T. deutlich erhöhten Konzentrationen unterschiedlicher Spurenelemente in Kartoffelstärke und Roggenmehl (Abb. 5-15), können diese in den Versuchspelletchargen nicht nachgewiesen werden (Anhang, Tabelle A-8). Die geringe Zumischung der PHM von max. 2 % führt offensichtlich zu einer so starken Verdünnung der kritischen Spurenelementgehalte (Na, K, Si), dass diese Veränderungen nicht nachweisbar sind. Lediglich bei der Versuchscharge mit 0,5 % Weizenstärke wurde ein 5-fach erhöhter Si-Gehalt gegenüber den Pellets ohne PHM festgestellt. Dies kann jedoch auch auf die Inhomogenität der Brennstoffprobe oder Verunreinigungen bei der Probenahme/-analyse zurückzuführen sein, da für alle anderen Weizenstärkepellets durchschnittliche Werte ermittelt wurden³⁰.
- **Ascheanalyse.** Abb. 5-16 zeigt die Zusammensetzung der Brennstoffaschen aller Versuchsbrennstoffe in Bezug auf die genannten charakteristischen Spurenelementgehalte. Unter Einbezug der Messtoleranzen für die Laboranalysewerte im Bereich von 10 bis 20 % sind keine Grenzwertabweichungen bei der Ascheanalyse sichtbar. Beim Vergleich der verschiedenen PHM-Arten und Dosierungen können keine Tendaussagen zur Versinterungs-/ Verschlackungsneigung abgeleitet werden.

Dagegen wird der Einsatz des unterschiedlichen Spanmaterials beispielsweise an der Schwankungsbreite der Si- und Ca-Gehalte der 1. und 2. VR deutlich sichtbar. Die Ascheproben der 2. VR (Probe 22 bis 31) weisen konsequent höhere Si und niedrigere Ca-Gehalte auf, was auf eine höhere Verschlackungsneigung als die Brennstoffe der 1. VR hindeutet.

³⁰ Aufgrund der eindeutigen Ergebnisse der Spurenelementanalyse der Brennstoffe der 1. VR wird für die Brennstoffproben der 2. VR nur eine Spurenelementanalyse der Rohmaterialien und der Brennstoffasche, nicht jedoch des Pressguts, durchgeführt.

Die leichte Erhöhung der K- und Ca-Gehalte bei den Brennstoffaschen der mit Dampf konditionierten Brennstoffe (Charge 27 bis 31) der 2. VR gegenüber denen ohne Dampf conditioning (Charge 22 bis 26) kann ein Hinweis sein, dass mit der Dampfzumischung zum Pressgut sich beispielsweise Ablagerungen im Konditionierer / Reifebunker gelöst haben und dadurch zusätzliche Spurenelemente in den Brennstoff eingetragen werden konnten (Anhang, Tabelle A-9).

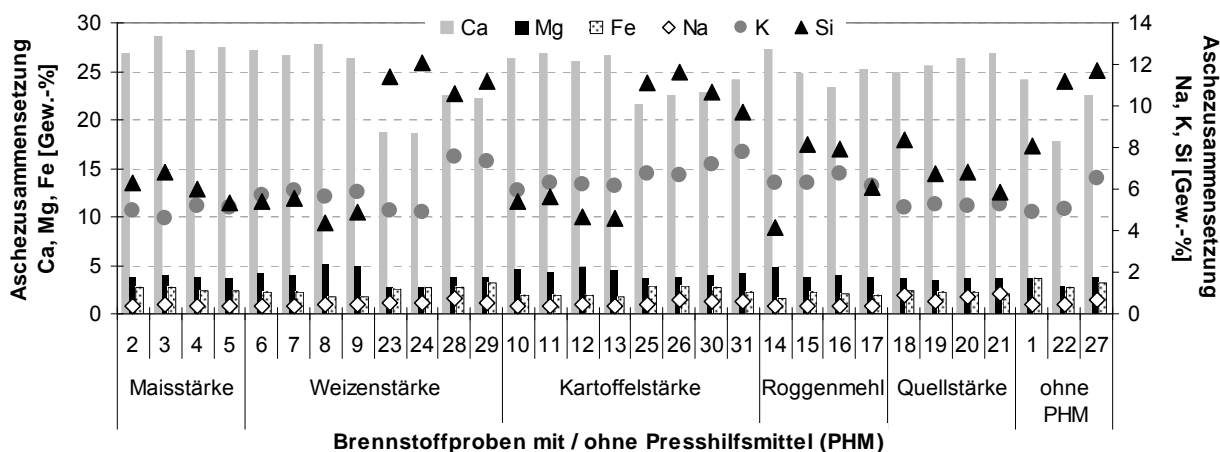


Abb. 5-16: Analyse ausgewählter Spurenelemente der Brennstoffaschen; 1. VR Charge 1-21; 2. VR Charge 22-31 (davon ohne Dampf conditioning 22-26, mit Dampf conditioning 27-31)

5.4.2 Charakteristische Temperaturphasen

Das Ascheschmelzverhalten eines Brennstoffs kann – außer durch eine Spurenelementanalyse der Rohstoffe (Kapitel 5.4.1) – auch rechnerisch und analytisch bestimmt werden (Kapitel 5.4.2). Dabei wird meist zwischen vier charakteristischen Temperaturphasen unterschieden.

Zur analytischen Bestimmung des Ascheschmelzverhaltens von Festbrennstoffen wird die zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung gültige DIN 51730 angewandt (Kapitel 4.3.3). Darin ist die Bestimmung der Erweichungs-, der Sphärisch-, der Halbkugel- und der Fließtemperatur der Asche beschrieben. Die wichtige Temperaturphase des Sinterbeginns ist jedoch nicht (mehr) enthalten, obwohl sie für biogene Brennstoffe eine besondere Relevanz besitzt, um rechtzeitig erste Brennstoffagglomerationen im Glutbett zu erkennen. Das Europäische Normungskomitee CEN/TC 335 hat diese Lücke mit der EN 15370-1 gefüllt und parallel dazu ein neues Analyseverfahren zur Bestimmung der charakterisierenden Temperaturbereiche des Ascheschmelzverhaltens etabliert. Dabei werden die folgenden Temperaturen unterschieden, die in Abb. 5-17 grafisch dargestellt sind:

- **Schrumpfungstemperatur** (SST, shrinkage starting temperature). Bei dieser Temperatur beginnt das Schrumpfen des Probekörpers. Die Fläche des Probekörperprofils sinkt unter 95 % seiner Ausgangsfläche. Das Schrumpfen kann infolge der Freisetzung von CO₂, flüchtigen Alkaliverbindungen und/oder Sintern erfolgen. Der Schrumpfungsbeginn ist aber messtechnisch nicht immer eindeutig feststellbar, weshalb seine Erfassung eine Zusatzinformation im Rahmen des Normprüfverfahrens darstellt.
- **Erweichungstemperatur** (DT, deformation temperature). Erste Anzeichen des Erweichens der Asche (z. B. Veränderung der Oberfläche, Abrundung der Kanten, beginnendes Blähen des Probekörpers) werden sichtbar.
- **Halbkugeltemperatur** (HT, hemisphere temperature). Der Probekörper nähert sich der Form einer Halbkugel an; der geschmolzene Probekörper ist halb so hoch wie seine Grundlinie.
- **Fließtemperatur** (FT, flow temperature). Der Probekörper ist auf ein Drittel seiner ursprünglichen Höhe auseinander geflossen /102/, /103/.

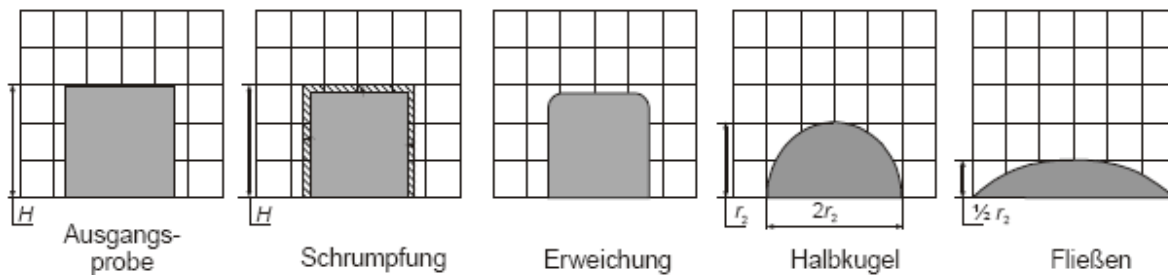


Abb. 5-17 Charakteristische Temperaturphasen zur Bestimmung des Ascheschmelzverhaltens eines Probekörpers gemäß des Prüfverfahrens nach EN 15370-1 (Ausgangsprobe = Form und Größe bei 550°C, h... Höhe der Probe, r_2 ... Radius der Halbkugel) /103/

Neben den beschriebenen Temperaturphasen des Ascheschmelzverhaltens sind die Temperaturunterschiede zwischen den kritischen Phasen von Bedeutung. Sie können einen Hinweis darauf geben, ob es in einer Feuerungsanlage zu einem fließenden Übergang von ersten Sintererscheinungen und dem Verkleben umliegender Asche-/Brennstoffteilchen bis zur Formation von immer größeren Verbackungen kommt. Derartige Verbackungen können im Feuerraumraum den Brennstoffnachschiebung blockieren und / oder bei ungünstigen Formationen die Luftführung in der Brennkammer behindern bzw. zu verstärkten Ablagerungen an den Wärmeübertragerflächen führen (Kapitel 3.4.2). Kommt es innerhalb kurzer Zeit zu einer Anhäufung solcher „Hotspots“ im Brennraum, kann es zu lokalen Temperaturstaus kommen und es können durchaus Glutbetttemperaturen $> 1\ 100^\circ\text{C}$ erreicht werden, wodurch das kritische Temperaturniveau der „erhöhten Verschlackungsneigung“ überschritten wird. In Pelletfeuerungsanlagen soll dies durch den kontinuierlichen automatisierten Abtransport der ausgebrannten Brennstoffteilchen aus dem Glutbett verhindert werden (Anhang, Kapitel A.8).

Die Verschlackungsneigung jedes Brennstoffs ist somit nur teilweise von seiner tatsächlichen Ascheschmelztemperatur (FT) abhängig. Vielmehr entscheidet die Temperaturspanne zwischen dem Auftreten der ersten Anzeichen für Ascheerweichungen (SST / DT) bis zur Anhäufung von funktionsstörenden Brennstoffagglomeraten (Verbackungen, Schlacke) im Feuerraum darüber, ob der Brennstoff einen gewissen Zeitraum Ascheschmelzformationen tolerieren kann oder nicht /2/, /199/.

5.4.2.1 Rechnerische Bestimmung

Da die Wirkung einige Spurenelemente, Alkali- und Erdalkalimetalle auf das Ascheschmelzverhalten eines Brennstoffs bekannt ist (Kapitel 2.2.2, 5.4.1), wird nachfolgend mit Hilfe von Näherungsformeln versucht, das Ascheschmelzverhalten aus der Elementanalyse abzuleiten. Zur Berechnung der charakteristischen Temperaturphasen werden verschiedene Gleichungen aus der Literatur (/103/, /246/, /247/) herangezogen. Diese bewerten den Einfluss der einzelnen Spurenelemente unterschiedlich; deshalb unterscheiden sie sich sowohl in den einbezogenen Elementgehalten als auch in den konstanten Multiplikatoren und der Bezugsbasis.

Während bei /103/ in die näherungsweise Bestimmung der Ascheerweichungs- (DT) und Fließtemperatur (FT)³¹ die Spurenelementanalyse der Brennstoffgehalte von Ca, K und Mg einfließt, verwendet /246/, /247/ die Ca, K und Si-Gehalte der Ascheanalyse.

Die Näherungsformeln zur Ermittlung von $DT_{theor.}$ und $FT_{theor.}$ geben eine Temperaturspanne an, in welcher eine erhöhte Verschlackungsneigung des Brennstoffs vorliegt /103/. Alle Elementgehalte müssen in Prozent der Brennstofftrockenmasse eingesetzt werden (Gleichung 5-1, Gleichung 5-2). Tendenziell folgt $FT_{theor.}$ immer $DT_{theor.}$ und in Bezug auf die vorliegenden Ergebnisse der Versuchsbrennstoffe der 1. VR mit einem leicht variierenden Abstand von 172 bis 180 K (Anhang, Tabelle A-9).

³¹ Zur besseren Unterscheidung der rechnerisch und analytischen bestimmten FT und DT werden alle Ergebnisse der Näherungsformeln nach /103/ mit dem Indize „theo.“ (theoretisch) gekennzeichnet.

$$DT_{theor.} = 1172 - 53,9 \cdot K + 252,7 \cdot Ca - 788,4 \cdot Mg \quad \text{Gleichung 5-1}$$

$$FT_{theor.} = 1369 - 43,4 \cdot K + 192,7 \cdot Ca - 698 \cdot Mg \quad \text{Gleichung 5-2}$$

Einen anderen Ansatz zur Abschätzung des Ascheschmelzverhaltens von biogenen Festbrennstoffen wird von /246/ im Jahr 2008 mit der Bestimmung eines Ca/(K+Si) Verhältnisses präsentiert. Hier wird Ca als das Element mit dem größten Einfluss auf das Ascheschmelzverhalten beschrieben, gefolgt von Si und K. Dagegen werden für die Elemente Mg, Na und P keine signifikanten Effekte nachgewiesen, weshalb diese in dem Berechnungsmodell keine Berücksichtigung finden. Tendenziell scheinen auch Fe und Al zur Erhöhung der Ascheschmelztemperaturen beizutragen, jedoch spielen sie scheinbar keine dominante Rolle und werden deshalb auch nicht in die Näherungsformel zur Bestimmung der Ascheerweichungstemperatur (T_{melt}) integriert (Gleichung 5-3) /246/. T_{melt} stellt den Mittelwert aus der SST, der DT und der HT dar. Alle Elementgehalte der Formel sind in Prozent der Gesamtasche einzusetzen:

$$T_{melt} = 120 \cdot \ln [Ca / (K + Si)] + 1252 \quad \text{Gleichung 5-3}$$

T_{melt} stellt einen Mittelwert der Schrumpf-, der Erweichungs- und der Halbkugeltemperatur dar. T_{melt} beschreibt somit die kritische Temperaturphase der Ascheerweichung im Umfeld von DT.

Im Jahr 2010 wurde eine Präzisierung der o. g. Näherungsformel veröffentlicht, die sowohl für holz- als auch für nicht-holzartige Biomassen geeignet sein soll (Gleichung 5-4) /247/. Auch hier stellt T_{melt} einen Mittelwert aus der SST, der DT und der HT dar und alle Elementgehalte der Formel sind in Prozent der Gesamtasche einzusetzen.

$$\ln[T_{melt}] = 7,24 - 0,33 \cdot Si - 0,70 \cdot K + 1,28 \cdot K \cdot Ca \quad \text{Gleichung 5-4}$$

In Bezug auf die vorliegenden Ergebnisse in Tabelle A-9 (Anhang) unterscheiden sich die Resultate von $T_{melt, 2008}$ und $T_{melt, 2010}$ ³² kaum (im Mittel um 7 K über alle Brennstoffproben). Dies gilt insbesondere auch dann, wenn man einen Toleranzbereich von +/-50°C für alle Untersuchungsergebnisse zum Ascheschmelzverhalten in die Diskussion einbezieht (Kapitel 4.4).

Tabelle 5-2: Spannbreite der rechnerisch ermittelten Temperaturen des Ascheschmelzverhaltens der Brennstoffproben der 1. + 2. VR (Einzelwerte Anhang, Tabelle A-9)

Temperaturen	1. Versuchsreihe		2. Versuchsreihe	
	Min.	Max.	Min.	Max.
$DT_{theor.}$	1 179°C	1 187°C	-	-
$FT_{theor.}$	1 360°C	1 363°C	-	-
$T_{melt, 2008}$	1 308°C	1 375°C	1 262°C	1 290°C
$T_{melt, 2010}$	1 309°C	1 368°C	1 247°C	1 292°C

$DT_{theor.}, FT_{theor.}$ rechnerisch ermittelte Ascheerweichungs- und -fließtemperatur /103/

$T_{melt, 2008}, T_{melt, 2010}$.. rechnerisch ermittelte Ascheerweichungstemperatur (Mittelwert aus SST, DT, HT) /246/, /247/

Beim Vergleich von $T_{melt,2008}$ und $T_{melt, 2010}$ mit den Ergebnissen für $DT_{theor.}$ und $FT_{theor.}$ liegt die maximale Temperaturspanne von T_{melt} über alle Brennstoffproben der 1. VR zwischen 1 308 bis 1 375°C und damit eher im Temperaturbereich der theoretisch ermittelten Fließtemperatur ($FT_{theor.} \varnothing = 1 362^\circ\text{C}$), während $DT_{theor.}$ bei durchschnittlich 1 184°C liegt. Im Fall der Brennstoffproben der 2. VR liegt die durchschnittlich ermittelte $T_{melt, 2008}$ mit 1 274 bzw. $T_{melt, 2010}$ mit 1 268°C wesentlich niedriger, weshalb diese Brennstoffproben generell eine höhere Neigung zur

³² Zur Unterscheidung der beiden unterschiedlichen Näherungsformeln zu T_{melt} nach /246/ aus dem Jahr 2008 und /247/ aus dem Jahr 2010 werden nachfolgend die Publikationsjahre als Indizes mitgeführt.

Versinterung / Verschlackung aufzeigen. Das Temperaturniveau von $DT_{theor.}$ und $FT_{theor.}$ liegt bei den Proben der 2. VR durchschnittlich 68 K unterhalb dem der 1. VR (Abb. 5-18). Aufgrund des hohen Holzanteils im Pellet (98 bis 100 %) dominiert dessen Spurenelementeintrag das Ergebnis von $DT_{theor.}$, $FT_{theor.}$ und T_{melt} und hat somit eine höhere Bedeutung als das verwendete PHM auf die Temperaturen. Es können keine allgemein gültigen Aussagen zur Vorteilhaftigkeit einer PHM-Art bzw. Dosierung hinsichtlich seiner Verschlackungsneigung gemacht werden.

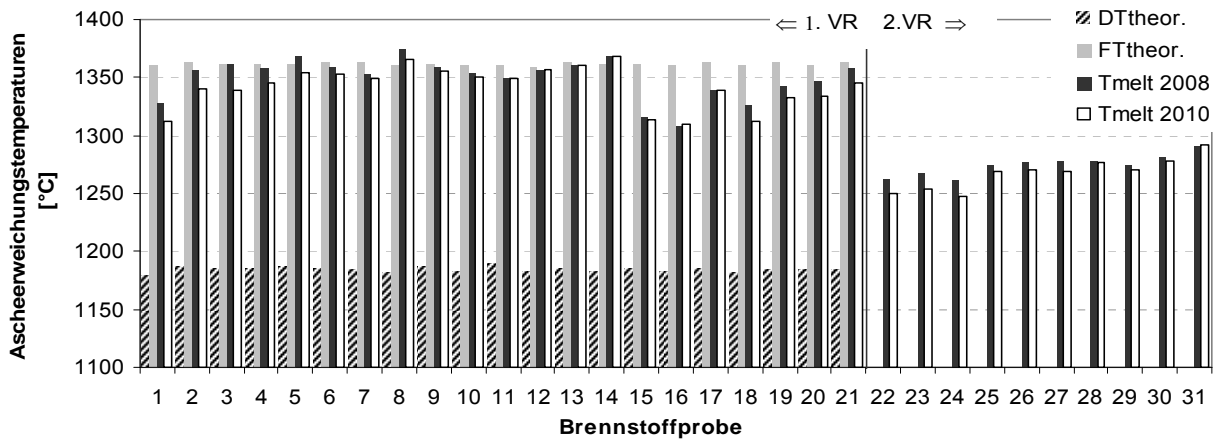


Abb. 5-18 Rechnerisch ermittelte Temperaturen zum Ascheschmelzverhalten der Versuchsbrennstoffe der 1 + 2. Versuchsreihe (VR) nach /103/, /246/, /247/

Unabhängig von der Berechnungsmethode ergeben sich keine Hinweise auf ein kritisches Ascheschmelzverhalten der Versuchschargen. Alle ermittelten Temperaturen zur Beschreibung des Ascheschmelzverhaltens liegen deutlich oberhalb der üblichen Feuerraumtemperaturen in KFA. Die niedrigste kritische Temperatur zur Beschreibung Ascheschmelzverhaltens wurde für die Brennstoffcharge mit 1,5 % Weizenstärke der 2. VR ($T_{melt, 2010} = 1247^{\circ}\text{C}$) und für Pellets ohne PHM der 1. VR ($DT_{theor.} = 1179^{\circ}\text{C}$) ermittelt (Anhang, Tabelle A-9).

5.4.2.2 Analytische Bestimmung

Die analytische Bestimmung der charakteristischen Temperaturen des Ascheschmelzverhaltens (DT, ST, HT und FT) der Versuchsbrennstoffe erfolgt nach DIN 51730 /2/.

Tabelle 5-3: Spannbreite der analytisch ermittelten Temperaturen des Ascheschmelzverhaltens der Brennstoffproben der 1. + 2. VR (Einzelwerte Anhang, Tabelle A-9)

Temperaturen	1. Versuchsreihe		2. Versuchsreihe	
	Min.	Max.	Min.	Max.
DT	1 260°C	1 460°C	1 160°C	1 250°C
FT	1 460°C	1 650°C	1 250°C	1 450°C

DT_{Labor} , FT_{Labor} analytisch ermittelte Ascheerweichungs- und -fließtemperatur

Beim Vergleich der Laborwerte für die die beiden Versuchsreihen aus Tabelle 5-3 zeigen sich deutliche Unterschiede im Ascheschmelzverhalten zwischen den Pellets der 1. und 2. VR. So liegen alle kritischen Temperaturen der 1. VR tendenziell in einem höheren Temperaturbereich (1 260 bis 1 650°C) als die der 2. VR (1 160 bis 1 450°C). Die durchschnittliche Temperaturdifferenz zwischen der analytisch ermittelten DT und FT beträgt im Fall der 1. VR etwa 225 K, bei der 2. VR nur etwa 115 K. Somit weist auch diese Analyse eine tendenziell höhere Versinterungs-/Verschlackungsneigung für die Brennstoffproben der 2. VR auf (Abb. 5-20). Die Brennstoffchargen mit den niedrigsten analytisch bestimmten Ascheerweichungstemperaturen (DT) stellen im Fall der 1. VR Pellets mit 1,0 % Kartoffelstärke und im Fall der 2. VR Pellets mit 1,5 % Kartoffelstärke (ohne Dampfkonditionierung) dar (Anhang, Tabelle A-9).

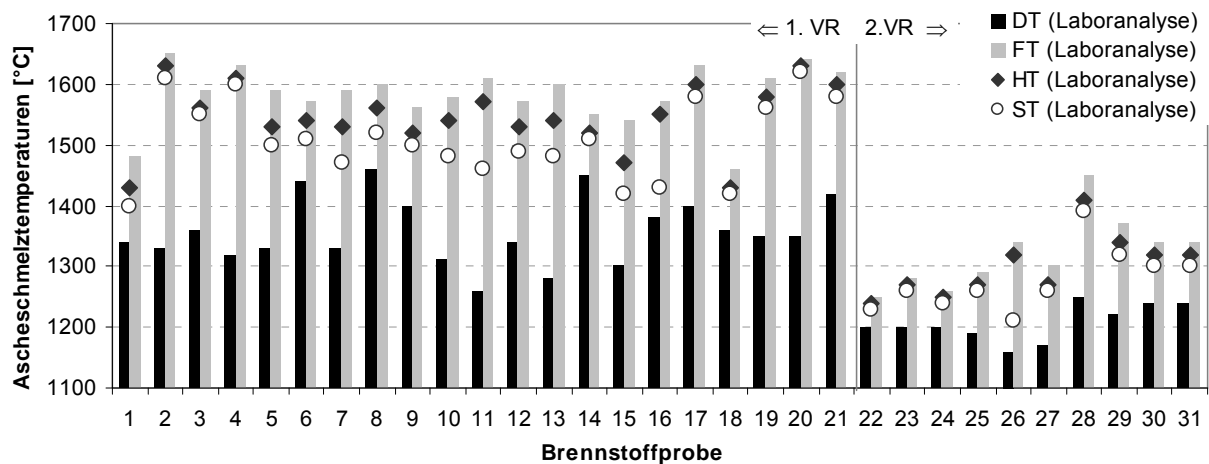


Abb. 5-19 Analytisch ermittelte Temperaturen des Ascheschmelzverhaltens der Versuchsbrennstoffe der 1 + 2. Versuchsreihe (VR) nach /2/

Bemerkenswert für die analytisch bestimmten Temperaturen ist die hohe Variation der Schwankungsbreite zwischen den charakteristischen Ascheschmelzphasen (DT und ST, ST und HT, HT und FT). Der Temperaturunterschied von DT und FT liegt minimal bei 50 K (Pellets ohne PHM ohne Dampf, 2. VR) und zeigt die höchste Abweichung bei 350 K (Pellets ohne PHM, 1. VR).

Im Gegensatz dazu besitzen z. B. die Pellets mit 1 % Kartoffelstärkezusatz (1. VR) die niedrigste analytisch bestimmte Ascheerweichungstemperatur mit 1 260°C, weisen allerdings auch die höchste Temperaturspreizung zwischen DT und FT mit 350 K auf (Anhang, Tabelle A-9). Das reale Verschlackungsrisiko der Brennstoffcharge ist demnach gering (vorausgesetzt die Temperatur in der Brennkammer überschreitet jemals 1 260°C), da selbst beim Auftreten lokaler Versinterungen im Feuerraum diese durch den kontinuierlichen Brennstoffnachschub oder die automatische Ascheabreinigung aus der heißen Brennzzone ausgetragen werden, bevor es zu Anbackungen kommt (Kapitel 3.4).

Somit haben auch die Ergebnisse der Laboranalyse für keine Brennstoffcharge eine Verschlackungs- / Versinterungsneigung aufgezeigt, die in den kritischen Temperaturbereich von KFA (zwischen 800 und 1 100°C) fällt (Abb. 5-19).

5.4.3 Fazit

Die Ergebnisse der ausgewählten Spurenelementanalyse der Versuchsbrennstoffe im Anhang, Tabelle A-9 zeigen, dass der Einfluss der normkonformen stärkehaltigen PHM auf das Ascheschmelzverhalten von Holzpellets vernachlässigbar ist. PHM weisen gegenüber dem Spanmaterial z. T. kritisch erhöhte Spurenelementgehalte auf, die auf eine Absenkung der Ascheschmelztemperatur deuten (Abb. 5-16). Aufgrund der geringen Dosierung der PHM in den Holzpellets kann jedoch kein signifikanter Einfluss auf das Ascheschmelzverhalten des Brennstoffs festgestellt werden (Abb. 5-20). Essentiell dafür ist jedoch, dass eine gute gleichmäßige Durchmischung des Pressguts vor der Pelletierung stattfindet, um eine partielle Wirkung der PHM im Feuerraum der Konversionsanlage (z. B. unter Bildung von lokalen Eutektika, Kapitel 2.2.1) zu verhindern. Im Gegensatz dazu haben das Rohholz bzw. die im Spanmaterial enthaltenen Spurenelemente einen hohen Einfluss auf das Ascheschmelzverhalten der Brennstoffaschen.

In Summe wurden in Kapitel 5.4.1 nur knapp 50 Gew.-% aller Elementgehalte der Gesamtasche identifiziert, da bisher nur für die ausgewählten Spurenelemente Erfahrungen zu ihrer Wirkung auf das Ascheschmelzverhalten bekannt sind. Es ist vorstellbar, dass neben K, Ca, Mg, Na, Fe und Si weitere Spurenelemente (z. B. Zn) ebenfalls das Ascheschmelzverhalten beeinflussen.

Näherungsformeln können einen Hinweis auf das Temperaturniveau geben (Kapitel 5.4.2.1), in dem sich ein kritisches Ascheschmelzverhalten eines Brennstoffs zeigt, wenn die Spurenelementgehalte für den Berechnungsansatz bekannt sind. Generell liegen für die Versuchsbrenn-

stoffchargen die rechnerisch ermittelten Temperaturen fast alle deutlich unter den im Labor ermittelten Werten von ST, HT und FT (Abb. 5-20). Der bedeutende Einfluss von Silizium im Brennstoff auf die Temperaturen des Ascheschmelzverhaltens (Absenkung der Temperaturniveaus) von Holzpellets kann bestätigt werden. Der Si-Eintrag in den Brennstoff kann auf das Spanmaterial zurückgeführt werden (Abb. 5-16).

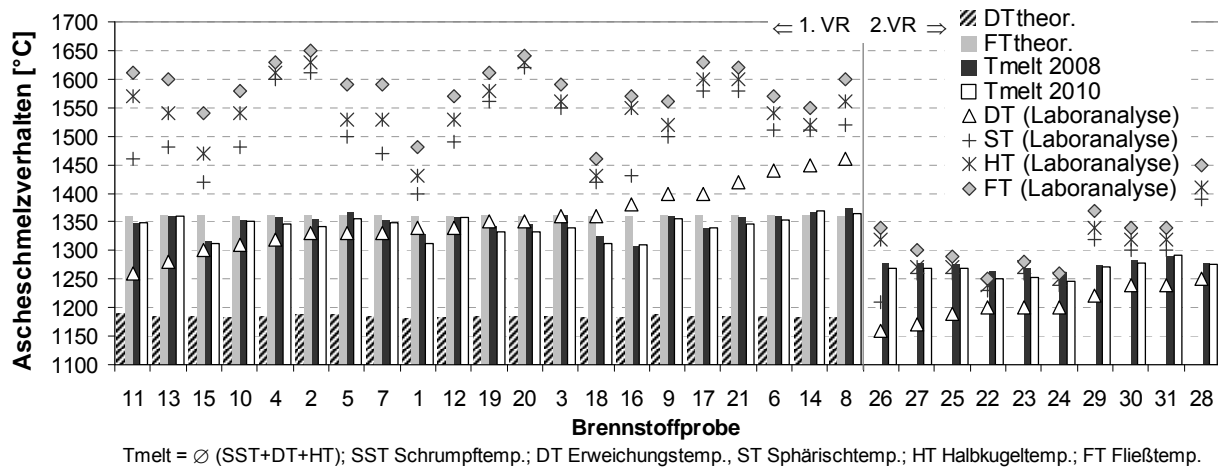


Abb. 5-20: Vergleich der rechnerisch und analytisch bestimmten Temperaturen des Ascheschmelzverhaltens der Versuchsbrennstoffe; Sortierung nach DT (Laboranalyse)

Lediglich die analytisch ermittelte DT fällt teilweise in den Temperaturbereich des rechnerisch bestimmten Ascheschmelzverhaltens. Beim Vergleich der rechnerisch ermittelten Temperaturen und den Werten der Laboranalyse wird deutlich, dass $T_{melt, 2008}$ ziemlich gut den Temperaturbereich der analytisch bestimmten DT beschreibt (mittlere Standardabweichung -8 K, bei $T_{melt, 2010}$ sind es -15 K). Dagegen liegt $DT_{theor.}$ mit einer Standardabweichung von -173 K deutlich unterhalb der Laboranalysewerte, während $FT_{theor.}$ nur eine durchschnittliche Standardabweichung von 4 K zur analytisch bestimmten DT hat. Somit zeigen die Untersuchungen hier, dass die beiden Näherungsformeln zur Bestimmung von T_{melt} relativ gut den Temperaturbereich der analytisch bestimmten Temperaturen HT, ST und FT abbilden, obwohl sie eigentlich einen Mittelwert aus SST, DT und HT darstellen sollen /246/, /247/. Da für eine praxisnahe Einschätzung des Ascheschmelzverhaltens eines Brennstoffs in einer Feuerungsanlage auch das Wissen der Temperaturspanne zwischen DT und FT wichtig ist, ist T_{melt} bisher nur begrenzt aussagefähig.

Zusammenfassend hat die Analyse des Ascheschmelzverhaltens aller Brennstoffproben aus den beiden Versuchsreihen verdeutlicht, dass die Ascheerweichungstemperatur (DT) bei keiner der untersuchten Holzpellets unterhalb der kritischen Feuerraumtemperatur von 1100°C liegt und damit ein erhöhtes Sinter- bzw. Verschlackungsrisiko zeigt. Dennoch weisen die Brennstoffchargen der 2. VR ein etwas niedrigeres Niveau der charakteristischen Ascheschmelztemperaturen auf, das auf das verwendete Spanmaterial zurückgeführt werden kann (Abb. 5-20). Die Untersuchungen haben gezeigt, dass trotz vergleichbarer Rohmaterialherkunft das Niveau der kritischen Ascheschmelztemperaturen um mehrere 100 K schwanken und die Temperaturspanne zwischen DT und FT deutlich variieren kann. Der Einsatz stärkehaltiger PHM hat zu keiner nachweisbaren Beeinflussung des Ascheschmelzverhaltens der Versuchsbrennstoffe geführt.

5.5 Einordnung der Brennstoffeigenschaften

Zur abschließenden Beurteilung der Eignung der Versuchsbrennstoffe für den Einsatz in Holzpellet-KFA werden nachfolgend die untersuchten Brennstoffparameter beider Versuchsreihen zunächst den brennstofftechnischen Anforderungen der DINplus (2007) gegenübergestellt. Anschließend erfolgt ein Vergleich mit den Brennstoffanforderungen der im Jahr 2011 in Kraft getretenen EN 14961-2 mit den Holzpelletklassen A1 und A2. Da in der Europäischen Norm

auch der Brennstoffparameter der Schüttdichte von Holzpellets Bedeutung hat (Anhang, Tabelle A-3), werden dazu zusätzliche Untersuchungen durchgeführt.

5.5.1 1. Versuchsreihe

In Tabelle 5-4 sind die Ergebnisse der Laboruntersuchungen der 21 Brennstoffchargen der 1. VR hinsichtlich des brennstoffspezifischen Wasser-, Asche-, PHM-, Schwefel-, Stickstoff- und Chlorgehalts sowie des Heizwertes und des Abriebes zusammenfassend dargestellt. Sie werden nachfolgend zusammen mit der Stückigkeit (Länge, Durchmesser) des Brennstoffs ausgewertet.

Tabelle 5-4: Vergleich der Brennstoffeigenschaften der Versuchschargen der 1. VR und ausgewählten Brennstoffanforderungen an Premiumpellets (weitere Parameter im Anhang, Tabelle A-3)

Parameter		DIN <i>plus</i> (2007)	Versuchsbrennstoffe mit /ohne PHM-Zusatz ^{a)}						EN 14961-2	
			ohne PHM	Mais- stärke	Weizen- stärke	Kartof- felstärke	Roggen- mehl	Quell- stärke	Klasse A1	Klasse A2
Durchmesser	mm	4 - 10	6	6	6	6	6	6	6 ± 1	
Länge	mm	≤ 5 x D	vgl. Abb. 5-21						3,15 - 40	
Wassergehalt	%	≤ 10,0	8,8	8,5-9,7	8,3-10,0	9,2-9,8	8,4-9,5	7,8-9,4	≤ 10,0	
Abrieb ^{b)}	%	≤ 2,3	6,1	1,3-2,4	0,9-2,7	0,7-1,1	1,2-1,7	1,4-1,5	≤ 2,5	
Aschegehalt ^{c)}	% _{wf}	≤ 0,50	0,54	0,33-0,39	0,31-0,34	0,31-0,40	0,31-0,38	0,33 -0,39	≤ 0,7	≤ 1,5
Heizwert ^{d)}	MJ/kg	≥ 18,0	18,5	18,3-18,6	18,5-18,7	18,5-18,8	18,5-18,8	18,4-18,7	16,5-19	16,3-19
S-Gehalt	% _{wf}	≤ 0,04	u.B.	u.B.	u.B.	u.B.	u.B.	u.B.	≤ 0,03	
N-Gehalt	% _{wf}	≤ 0,30	0,33	0,34-0,37	0,30-0,34	0,35-0,37	0,34-0,36	0,33 -0,35	≤ 0,30	≤ 0,50
Cl-Gehalt	% _{wf}	≤ 0,02	u.B.	u. B.	u.B.	u.B.	u.B.	u.B.	≤ 0,02	
PHM-Zusatz	%	≤ 2,0	0	0,5-2,0	0,5-2,0	0,5-2,0	0,5-2,0	0,5-2,0	≤ 2,0	

^{a)} Einzubeziehende Messtoleranzen siehe Kapitel 4.4; u. B. ...unterhalb der Bestimmungsgrenze von 0,01

^{b)} Während für den Abriebtest nach DIN*plus* der Ligno-Tester LT II der Fa. Borregaard Lignotech als Analysegerät empfohlen wird, ist in der 14961-2 die Bestimmung nach EN 15210-1 mit der Tumbler-Box beschrieben. Ein direkter Vergleich der Analyseergebnisse ist deshalb nicht sinnvoll.

^{c)} Es ist kein direkter Vergleich der Analysewerte mit den EN-Anforderungen möglich, da Bestimmungsmethode verändert wurde (Veraschungstemperatur von 815°C bei DIN*plus* auf 550°C bei EN abgesenkt, damit findet nach DIN*plus* ein höheren Kohlenstoffausbrand Partikelver-/ausdampfung der Alkalimetalle und Chloride statt).

^{d)} EN-Heizwert bezieht Brennstoffwassergehalt ein, während DIN*plus* sich auf wasserfreie Brennstoffprobe bezieht

Wassergehalt. Die Analyse der Brennstoffwassergehalte zeigt, dass alle Versuchschargen den Brennstoffanforderungen hinsichtlich eines maximalen Wassergehalts von 10 % entsprechen.

Abrieb. Bis auf die Chargen der Pellets ohne PHM-Einsatz und den Pellets mit 0,5 % Maisstärke bzw. Weizenstärke erfüllen alle anderen Brennstoffproben die DIN*plus*-Anforderungen, da deren ermittelter Abriebwert den Grenzwert von 2,3 % nicht überschreitet. Trotz des etwas höheren Grenzwertes von 2,5 % (DU97,5) der EN-Norm können aufgrund der modifizierten Bestimmungsmethode keine Aussage gemacht werden, ob die o. g. 3 kritischen Brennstoffchargen den EN-Anforderungen für A1-Pellets zur mechanischen Festigkeit genügen oder nicht. Im Zweifelsfall müssen sie der Qualitätsklasse B (DU96,5) nach 14961-2 zugeordnet werden, da auch für A2-Pellets eine mechanische Festigkeit von DU97,5 gefordert wird (Anhang, Tabelle A-3).

Aschegehalt. Die Anforderungen an den Aschegehalt von maximal 0,5 % nach DIN*plus* werden von allen Brennstoffchargen eingehalten. Den höchsten Aschegehalt weisen die Pellets ohne PHM-Einsatz mit 0,54 % auf. Da der Aschegehalt aller Versuchsbrennstoffe deutlich unterhalb des EN-Grenzwertes von 0,7 % liegt, wird davon ausgegangen, dass – auch bei Anwendung der modifizierten Bestimmungsmethode (Tabelle 5-4) – die Brennstoffanforderungen hinsichtlich des maximalen Aschegehalts eingehalten werden. Im Zweifelsfall müssen die Pellets ohne PHM der Brennstoffklasse A2 zugeordnet werden, für die ein Grenzwert von 1,5 % Aschegehalt gilt.

Heizwert. Der Heizwert aller Brennstoffchargen liegt deutlich oberhalb von 18 MJ/kg_(wf), womit auch hier – trotz unterschiedlicher Bezugsbasis in Norm und Zertifizierungssystem (Tabelle 5-4) – die minimalen Heizwertanforderungen von allen Brennstoffchargen erreicht werden.

Elementaranalyse. Der Schwefel- und Chlorgehalt der Brennstoffproben liegt bei allen Brennstoffproben unterhalb der messtechnischen Bestimmungsgrenze, womit die Grenzwertanforderungen beider Normen erfüllt werden.

Die Ergebnisse der Laboranalyse zum Stickstoff-Gehalt zeigen jedoch, dass – selbst unter Einbezug von 10 % Messtoleranz – 16 der 21 Brennstoffchargen den zulässigen Grenzwert von 0,3 Gew.-% leicht überschreiten (max. 0,38 Gew.-% für Pellets mit 0,5 % Kartoffelstärke) und damit nicht den Brennstoffanforderungen der DIN*plus* und der EN 14961-2 (A1) entsprechen. Unproblematisch lässt sich demgegenüber die Einordnung der kritischen Pelletchargen in die Brennstoffklasse A2 der EN 14961-2 (N-Grenzwert 0,5 %) darstellen. Die erhöhten Stickstoffgehalte treten bei nahezu allen Pelletchargen auf. Eine Verunreinigung der Laborproben durch Luft- oder Abgasemissionen während der Holzpelletproduktion bzw. des Transports kann weitestgehend ausgeschlossen werden. Die Laborwerte der PHM zeigten, dass lediglich für Roggenmehl ein kritisch erhöhter N-Gehalt gegenüber dem Spanmaterial vorliegt (Kapitel 5.2) Deshalb kann die PHM-Zumischung nicht als Ursache der hohen N-Gehalte herangezogen werden. Somit dürften die erhöhten N-Gehalte der Versuchsbrennstoffe in dem angelieferten Spanmaterial begründet liegen, was der bereits grenzwertige N-Gehalt von 0,33 Gew.-% der Pellets ohne PHM-Einsatz bestätigt (Anhang, Tabelle A-8). Möglich ist, dass das Rohholz entweder standortbedingt einer erhöhten N-Konzentration im Boden ausgesetzt war und deshalb im Laufe seiner Wuchslebenszeit überdurchschnittlich viel N aufgenommen hat; und / oder das Spanmaterial wurde unsauber entrindet und weist deshalb kritische N-Gehalte auf (Kapitel 2.2.2.2).

Die untersuchten Spurenelementgehalte beschränken sich auf die für das Ascheschmelzverhalten charakteristischen Elemente (Na, K, Mg, Fe, Si), da nur bei chemisch belasteten Rohmaterialien erhöhte Werte von As, Cu, Pb, Cd, Zn, Cr, Ag und Ni erwartet werden (Kapitel 5.3.3.2). Eine chemische Verunreinigung der Einsatzstoffe wird ausgeschlossen.

PHM-Einsatz. Der maximale PHM-Einsatz von 2 % wird bei keiner Versuchscharge überschritten und damit den Brennstoffanforderungen entsprochen.

Stückigkeit. Entsprechend der DIN*plus* gilt für Pellets mit einem 6 mm Durchmesser eine maximale Pelletlänge bis 3 cm einzuhalten. Laut Norm dürfen lediglich 20 % der Pellets einer Brennstoffprobe länger als 3 cm sein, aber keines eine Länge von 4,5 cm überschreiten. Laut EN 14961-2 soll bei 6 mm Pellets generell eine Länge von 4 cm nicht überschritten werden; maximal 1 % der Brennstoffcharge darf bis 4,5 cm lang sein (Anhang, Tabelle A-3).

In Abb. 5-21 ist die Verteilung der Pelletlängen beispielhaft untersuchter Brennstoffchargen dargestellt. Während bei den Pellets ohne PHM-Einsatz und dem hohen Abriebswert von 6,1 % der überwiegende Anteil der Pellets nur eine Länge bis 2 cm erreicht, hat bei den Pellets mit PHM-Einsatz der überwiegende Anteil eine Länge zwischen 1 bis 3 cm. Bei den Brennstoffchargen mit 0,5 % und 1,5 % Kartoffelstärke bzw. den Pellets mit 0,5 % und 1,5 % Spezial-Quellstärke ist mit der steigenden PHM-Konzentration die Verschiebung der prozentualen Pelletlänge zu einem höheren Anteil längerer Pellets erkennbar. Die höhere PHM-Dosis trägt somit zu einer Erhöhung der durchschnittlichen Pelletlänge bei.

Der Abrieb stellt ein Indiz für die Festigkeit des Brennstoffs dar. Je mehr Bruchkanten eine Pelletmenge aufweist (mehr kurze Pellets), desto größer ist deren raue Pelletendstückoberfläche und damit der potenzielle Abrieb. Tendenziell scheinen Pellets mit Mais- und Weizenstärke eine etwas geringere Brennstofffestigkeit aufzuzeigen als die anderen PHM. Im Vergleich aller Versuchschargen weisen sie mit 1,5 % PHM-Zusatz den höchsten Anteil an kleinen und mittleren Pellets auf (bis 2 cm, Abb. 5-21).

Bei fast allen Chargen treten Pellets mit Überlängen auf (d. h. größer 3 cm). Ihr Anteil an der Gesamtmasse der Brennstoffprobe ist jedoch gering (< 5 %). Keine Versuchscharge weist Pellets

mit einer Länge über 4 cm auf. Somit erfüllen alle Versuchsbrennstoffe die Brennstoffanforderungen der DINplus und der EN-Norm 14961-2 hinsichtlich der Pelletdimensionierung.

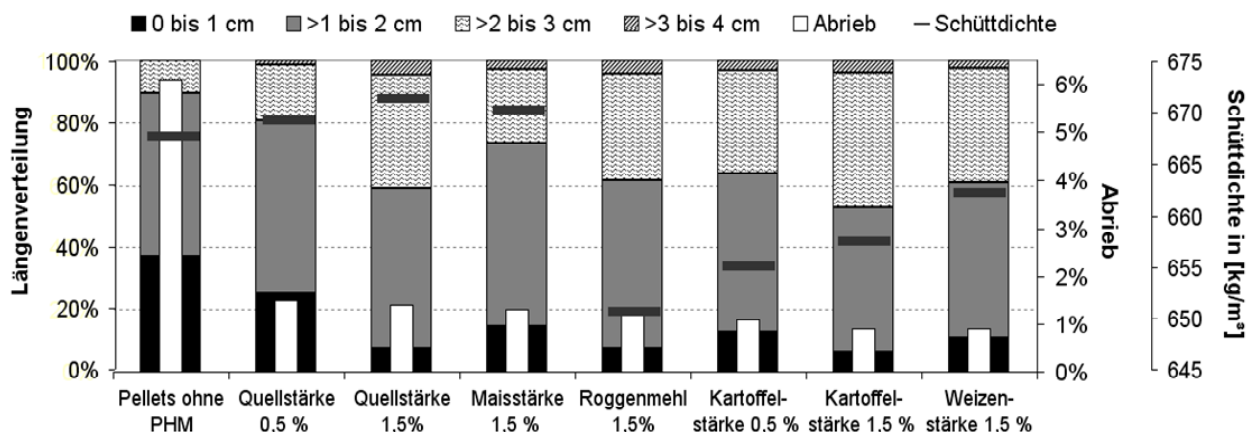


Abb. 5-21: Längenverteilung, Abrieb und Schüttdichte ausgewählter Brennstoffchargen der 1. VR

Schüttdichte. Da in der DINplus (2007) keine Mindestanforderungen bezüglich der Schüttdichte definiert sind, werden die Vorgaben der EN-Norm herangezogen, in der eine Mindestschüttdichte von 600 kg/m³ gefordert wird. In Abb. 5-21 sind deshalb die Ergebnisse der Schüttdichtenanalyse der untersuchten Pelletchargen dem Abrieb und der Längenverteilung der Pellets gegenübergestellt. Pellets mit einer hohen Abriebfestigkeit und einem hohen Anteil an längeren Pellets weisen z. T. eine geringere Schüttdichte (z. B. Pellets mit Roggenmehl- und Kartoffelstärkezusatz) auf als Pellets von geringerer Festigkeit und Stückigkeit (z. B. Maisstärkepellets, Pellets ohne PHM). Die hohen Klein- und Feianteile bei Pellets von geringer Festigkeit können besser die Füllräume zwischen den Pellets auffüllen und erhöhen so das Masse / Volumenverhältnis des Brennstoffs. Anhand der Messergebnisse ist erkennbar, dass die Mindestanforderungen an die Schüttdichte eher überschritten werden, da sich dies positiv auf das mögliche Brennstofflager- und -transportvolumen auswirkt (Kapitel 3.2.4). Eine hohe Schüttdichte stellt jedoch nicht unbedingt ein Anzeichen für eine optimierte Brennstofffestigkeit dar, da zu kurze Pellets bei automatisierten Brennstofffördersystemen sogar zu Problemen beim Pelleteintrag in den Feuerraum bzw. beim Ausbrand der Pellets führen können /2/, /259/.

5.5.2 2. Versuchsreihe

Ausgehend von den Laboranalysewerten in Tabelle 5-5 wird nachfolgend eine Einordnung der 10 Versuchchargen der 2. VR gegenüber den Brennstoffanforderungen für Premiumpellets vorgenommen. Zusätzlich werden Aussagen zur Stückigkeit der Brennstoffproben gemacht (Pelletlänge und Durchmesser).

Tabelle 5-5: Vergleich der untersuchten Brennstoffeigenschaften der Versuchchargen der 2. VR mit den Brennstoffanforderungen an Premiumpellets

Parameter	DIN plus	Versuchsbrennstoffe mit /ohne PHM-Zusatz ^{a)}						EN 14961-2	
		ohne PHM o. D.	Weizenstärke m./o. D.	Kartoffelstärke m./o. D.	ohne PHM m. D.	Weizenstärke m./o. D.	Kartoffelstärke m./o. D.	Klasse A1	Klasse A2
Durchmesser mm	4 - 10	6	6	6	6	6	6	6 ± 1	
Länge mm	≤ 5 x D	vgl. Abb. 5-22						3,15 - 40	
Wassergehalt %	≤ 10,0	12,2	12,3-12,5	11,3-12,4	15,2	11,0-11,1	10,7-10,9	≤ 10,0	
Abrieb ^{b)} %	≤ 2,3	1,9	1,2-1,5	1,0-1,5	1,5	1,5-1,8	1,0-1,5	≤ 2,5	
Aschegehalt ^{c)} % _{wf}	≤ 0,50	0,42	0,48-0,51	0,47-0,55	0,45	0,45-0,58	0,39-0,42	≤ 0,7	≤ 1,5
Heizwert ^{d)} MJ/kg	≥ 18,0	18,9	18,6-18,7	18,5-18,6	18,7	18,7-18,8	18,6-18,8	16,5-19	16,3-19

S-Gehalt	% _{wf} ≤ 0,04	u.B.	u.B.	u.B.	u.B.	u.B.	u.B.	u.B.	≤ 0,03
N-Gehalt	% _{wf} ≤ 0,30	0,27	0,27-0,29	0,29-0,30	0,32	0,28-0,31	0,28 -0,32	≤ 0,30	≤ 0,50
Cl-Gehalt	% _{wf} ≤ 0,02	u.B.	u. B.	u.B.	u.B.	u.B.	u.B.	≤ 0,02	
PHM-Zusatz	% ≤ 2,0	0	0,5-1,5	0,5-1,5	0	0,5-1,5	0,5-1,5	≤ 2,0	

a, b, c, d) siehe Tabelle 5-4, m. D....mit Dampfkonditionierung, o. D....ohne Dampfkonditionierung, D...Durchmesser

Wassergehalt. Die Laborergebnisse des Brennstoffwassergehalts erreichen bei allen Versuchsschichten der 2. VR kritische Werte bis deutliche Grenzwertüberschreitungen gegenüber den Brennstoffanforderungen. Da große Unsicherheiten hinsichtlich der Schwankungsbreite der Analysedaten bestehen, wird der Parameter des Pelletwassergehalts aus der normativen Einordnung der Pellets ausgeschlossen (vgl. Kapitel 5.3.3.2).

Abrieb. Die Anforderungen an die mechanischen Festigkeit des Brennstoffs erlauben einen maximalen Abrieb von 2,3 % bei Anwendung der DINplus und 2,5 % in Bezug auf die EN-Norm an. Beide Grenzwerte werden eingehalten. Der höchste Abriebgehalt beträgt 1,9 % für die Pellets ohne PHM und ohne Anwendung der Dampfkonditionierung.

Aschegehalt. Nur bei der Holzpelletcharge mit 1,5 % Weizenmehlzusatz und Dampfkonditionierung wird der maximal zulässige Aschegehalt von 0,5 % selbst unter Einbeziehung einer Messtoleranz von 10 % überschritten. Generell ist der durchschnittliche Aschegehalt der Brennstoffchargen der 2.VR mit 0,47 % deutlich höher als der 1. VR mit 0,36 % (Anhang, Tabelle A-8). Die relativ konstant hohen Aschegehalte der Brennstoffproben der 2. VR deuten auf einen erhöhten Anteil an nicht brennbaren Spurenelementen im Material hin, der anhand der Ascheanalysen auch nachweisbar ist (Anhang, Tabelle A-9). Als Ursache kommt z. B. ein höherer Restindenanteil des Spanmaterials oder ungünstige Aufwuchsstandorte des Holzes in Betracht (Kapitel 2.2.1, 3.1).

Heizwert. Der Heizwert aller Brennstoffchargen liegt deutlich oberhalb von 18 MJ/kg_(wf), womit auch hier die minimalen Heizwertanforderungen beider Normen von allen Brennstoffchargen erreicht werden (Kapitel 5.5.1).

Stückigkeit. Da die Pelletierung der Brennstoffchargen der 2. VR ebenfalls mit einer 6 mm Bohrlochdurchmesser-Pressmatrize durchgeführt wird, entspricht der Pelletdurchmesser den Brennstoffanforderungen. Auch die Überprüfung der Pelletlängen hat keine auffälligen Abweichungen aufgezeigt (Abb. 5-22). Der laut DINplus zulässige Anteil an Überlängen von max. 20 % der Pellets einer Brennstoffprobe wird zu maximal 5 % genutzt. Es sind keine Pellets mit Längen über 4 cm aufgetreten. Eine Korrelation der Pelletlängenverteilung mit der Abriebfestigkeit der Pellets kann auch anhand der Messergebnisse der 2. VR nicht aufgezeigt werden.

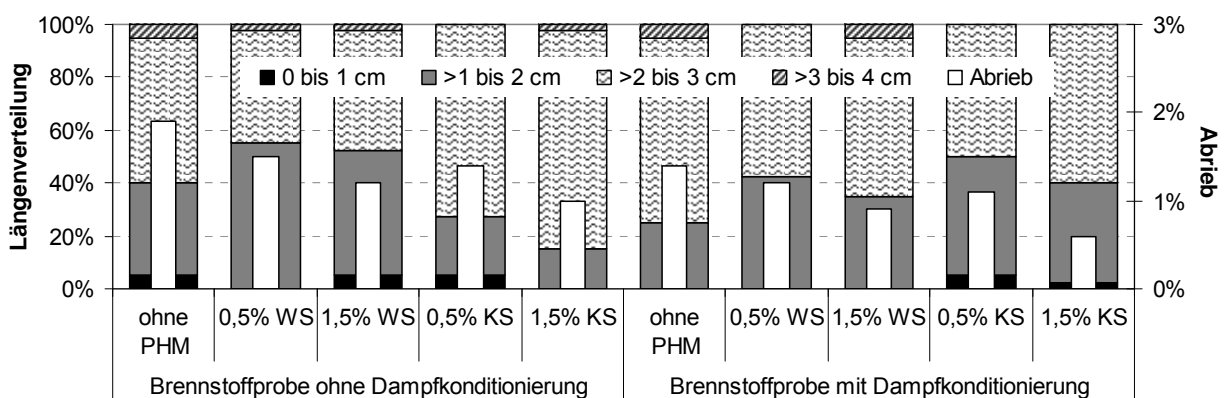


Abb. 5-22: Längenverteilung und Abrieb der Brennstoffchargen der 2. VR

Elementaranalyse. Die Elementaranalyse der Spanprobe und der verwendeten PHM gibt keine Hinweise auf Grenzwertüberschreitungen in Bezug auf die Normanforderungen. Im Vergleich

zur 1. VR werden von allen Versuchsbrennstoffen der 2. VR auch die zulässigen Stickstoffgehalte eingehalten.

PHM-Einsatz. Da der maximale PHM-Einsatz während der 2. VR nur 1,5 % beträgt, werden die Brennstoffanforderungen bei keiner Versuchscharge überschritten.

5.5.3 Fazit

Die Analyse der Versuchsbrennstoffe der 1. VR hinsichtlich der Einordnung der Brennstoffparameter nach der DIN*plus* ergibt, dass nur drei der 21 Brennstoffchargen die Normanforderungen hinsichtlich der untersuchten Brennstoffkennwerte erfüllen. Dabei handelt es sich um die Holzpellets mit 1 % und 2 % Weizenstärkezusatz und um die Charge mit 1 % Spezial-Quellstärke. Von den verbliebenen 18 Chargen werden von 16 die Brennstoffanforderungen an Premiumpellets nicht erfüllt, da sie einen erhöhten Stickstoffgehalt aufweisen. Bei dem Versuch der Einordnung der Analysedaten nach der EN-Norm 14961-2 treten vereinzelt Schwierigkeiten auf, weil die Bestimmungsmethoden bzw. die Bezugsebene sich von denen nach DIN*plus* (2007) unterscheiden. Da zum Zeitpunkt der Durchführung der Praxisversuche die EN-Bestimmungsmethoden noch nicht verfügbar waren, können auch nur die drei o. g. Versuchschargen definitiv der Pelletklasse A1 nach der EN-Norm zugeordnet werden. Bis auf die Pellets ohne PHM erfüllen die verbleibenden Chargen mindestens die Brennstoffanforderungen der Pelletklasse A2. Aufgrund der geringen Abriebfestigkeit entsprechen die Pellets ohne PHM dagegen nicht einmal der Pelletklasse B (vgl. Anhang, Tabelle A-4).

Für die Brennstoffchargen der 2. VR wird festgestellt, dass mindestens zwei der 10 Pelletchargen den Brennstoffanforderungen der DIN*plus* und den prEN 14961-2 (A1) einhalten. Dabei handelt es sich um die Pelletschargen mit 0,5 % und 1,5 % Kartoffelstärke und Dampfkonditionierung. Bei den verbliebenen 8 Chargen treten vor allem Grenzwertüberschreitungen in Bezug auf den Brennstoffwasser- und Aschegehalt auf. Für die eindeutige Zuordnung der Pelletcharge mit 1,5 % Weizenstärke und Dampfkonditionierung ist eine erneute Aschegehaltsanalyse nach der heute gültigen EN-Bestimmungsmethoden notwendig (Anhang, Tabelle A-5), um eine zweifelsfreie Zuordnung zur Pelletklasse A1 (Grenzwert 0,7 %) oder A2 (Grenzwert 1,5 %) machen zu können. Alle Brennstoffchargen der 2. VR weisen Abriebfestigkeiten deutlich unterhalb der Brennstoffanforderungen auf. Dabei kann die Festigkeit der Pellets mit Dampfkonditionierung gegenüber Pellets ohne Dampfkonditionierung im Mittel um fast 0,4 % verbessert werden.

Im Ergebnis der Brennstoffeinordnung können alle getesteten PHM für die Premiumpelletherstellung als geeignet bezeichnet werden. Zur Einhaltung der Brennstoffanforderungen stellen insbesondere die Abriebfestigkeit (mechanische Festigkeit), der Aschegehalt sowie der Stickstoffgehalt der Holzpellets kritische Selektionsparameter dar.

6 EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE BRENNSTOFFEESTIGKEIT

Aufbauend auf den theoretischen und praktischen Untersuchungsergebnissen aus den Kapiteln 2 bis 5 wird nachfolgend eine zusammenfassende Prozesskettenanalyse durchgeführt. Ziel ist es dabei, die Einflussfaktoren/ -parameter zu spezifizieren die eine Lenkungswirkung auf die Brennstoffeigenschaften von Holzpellets haben. Parallel dazu werden mögliche Schwachstellen im Pelletierprozess aufgezeigt, an denen gezielte Eingriffsmöglichkeiten negative Auswirkungen auf die brennstoffspezifischen Eigenschaften von Holzpellets hemmen oder ausgleichen können. Anschließend wird die Bedeutung der Einflussfaktoren mit einer Lenkungswirkung auf die Brennstofffestigkeit bewertet.

6.1 Vorgehen

Die Ergebnissynthese zur Identifikation der Einflussfaktoren umfasst alle Einzelprozesse der Rohmaterialbereitstellung und –aufbereitung für die Pelletierung, die Brennstoffproduktion sowie die nachgelagerten Prozessschritte der Brennstoffdistribution bis zur Produktübergabe der Pellets an den Endkunden – einschließlich der Zuführung der Pellets zur Wärmebereitstellung in eine KFA (Abb. 6-1). Dabei wird einerseits auf das Basiswissens aus Kapitel 2 und die technische Prozesskettenbeschreibung in Kapitel 3 zurückgegriffen. Die bereits im Kapitel 4.1 für die Pelletierversuche in den Fokus gerückten Einsatzstoff- und Prozessparameter zur Beeinflussung der Brennstofffestigkeit während der Pelletproduktion sowie die während der Versuchsdurchführung gewonnen Ergebnisse (Kapitel 5) fließen ebenfalls in die ganzheitliche Prozesskettenanalyse ein. Zusätzlich erfolgt ein Abgleich und ggf. Ergänzungen der Untersuchungsergebnisse durch in der Literatur dokumentierte Zusammenhänge.

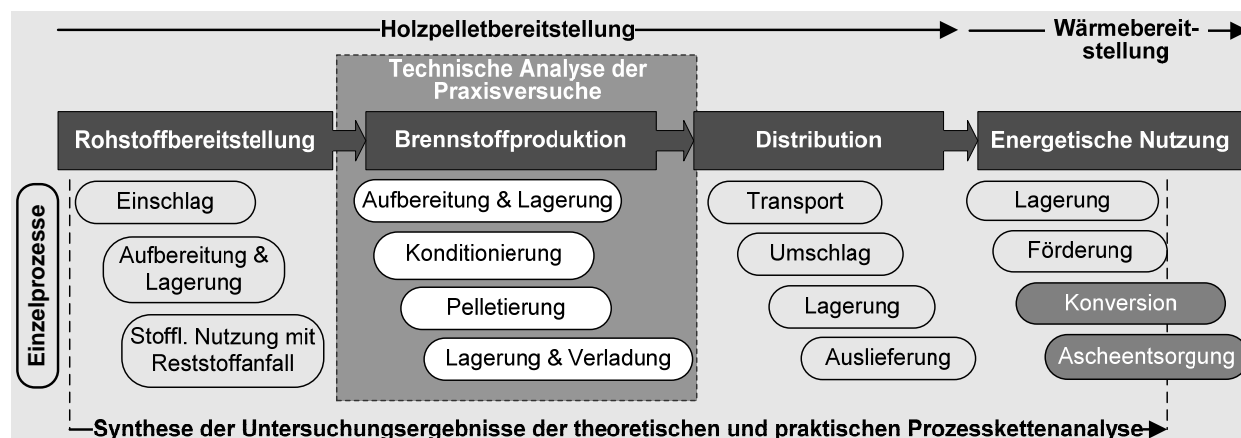


Abb. 6-1: Prozesskettenbetrachtung zur Identifikation von Einflussfaktoren auf die Brennstoffeigenschaften von Holzpellets (ohne Brennstoffkonversion und Ascheentsorgung)

Für die Ergebnissynthese wird zunächst aufgezeigt, wo, wie und durch welche Faktoren die Holzpelleteigenschaften während der Brennstoffbereitstellung beeinflusst werden, aber auch wie die Auswirkungen durch natürliche / rohstoffbedingte, technische und / oder managementbedingte / humane Einflussnahmemöglichkeiten zielorientiert gelenkt werden können (Kapitel 6.2). Dabei werden auch die Einflussoptionen auf informative Brennstoffkenngrößen und spezifische Endverbraucheransprüche (z. B. Ascheschmelzverhalten, Farbe und Glanz der Pellets³³, Verunreinigungen) einbezogen. Anhand einer Matrixdarstellung wird der Einflussbereich aller identifizierten Faktoren auf die Brennstoffanforderungen verdeutlicht. Dafür wird eine einfache qualitative Kriterienanalyse durchgeführt, bei der zunächst nur festgestellt wird, ob eine Beeinflussung der Brennstoffeigenschaften möglich ist oder nicht (Abb. 6-2).

³³ Eine helle, glänzende Oberflächenbeschaffenheit der Pellets stellt bei Endverbrauchern ein Qualitätsmerkmal dar, welches bisher in keiner Norm festgehalten ist. Deshalb gelten Farbe und Glanz der Pellets auch seitens des Pelletproduzenten als ein Marketingkennzeichen /2/, /169/.

Im Kapitel 6.3 erfolgt anschließend eine quantitative Bewertung der Einflussfaktoren, die speziell für die Lenkung der Brennstofffestigkeit relevant sind. Dabei wird zwischen der Art der Einflussnahmemöglichkeiten unterschieden (natürlich/ rohstoffbedingt, technisch, managementbedingt). Die Bewertung wird anhand unterschiedlicher Bewertungsgrößen durchgeführt; dabei bedeutet 0 = kein Einfluss und 1 = Einfluss gegeben. Die Bewertungsgröße 0,5 wird als Option einer teilweisen Einflussnahme definiert, wenn nur bestimmte Rahmenbedingungen erfüllt werden können oder der Einfluss sehr eingeschränkt ist.

6.2 Identifizierung von Einflussfaktoren

6.2.1 Rohmaterialeigenschaften

Aus technischer Sicht eignen sich nahezu alle Hölzer zur Pelletierung. Optimale Pelletiererfolge werden jedoch nur erreicht, wenn ein Rohmaterial (Holz plus eventuell eingesetzte Additive) mit möglichst homogenen und bekannten Eigenschaften vorliegt. Generell gilt, dass alle chemischen Elemente des Rohmaterials auch nach der Holzpelletierung im Brennstoff wieder zu finden sind /103/. Dabei bestimmt die Holzart und deren Aufwuchsbedingungen maßgeblich die Zusammensetzung des Holzes und damit über die Eignung des Rohmaterials zur Pelletierung. Dagegen kennzeichnen der Wassergehalt und die physikalisch-mechanischen Eigenschaften des Rohstoffs (Tabelle 2-3) eher den Aufbereitungsaufwand und die Lagerfähigkeit der Biomasse.

In Tabelle 6-1 werden die Einflussmöglichkeiten der chemischen Bestandteile des Rohmaterials auf den Pelletierprozess erläutert und auch deren Einfluss auf die physikalisch-mechanischen Brennstoffeigenschaften dargestellt. Zusätzlich wird die Bedeutung des Wasser- und Rindenanteils als Rohstoffparameter in die Tabelle aufgenommen.

Tabelle 6-1: Einflussmöglichkeiten des Rohmaterials auf die Lenkung der brennstoffspezifischen Eigenschaften während der Holzpelletproduktion und -bereitstellung /2/, /10/, /28/, /29/, /85/, /91/, /103/, /128/, /132/, /136/, /140/, /152/, /184/, /230/, /231/, /259/

Parameter	Ursache und Auswirkungen
Zusammensetzung	
Grundsubstanz	<ul style="list-style-type: none"> Je nach Holzart/-spezies/-fraktion/-alter und Jahreszeit variieren die Massenverhältnisse der Grundsubstanzen und sonstiger Inhaltsstoffe im Holz, wodurch der Konditionierungsaufwand des Materials schwankt und somit auch die Pelletierbarkeit des Einsatzstoffs beeinflusst wird (Kapitel 2.2.1) Massenanteile von Cellulose, Hemicellulose und Lignin beeinflussen den Kohlenstoffgehalt des Rohstoffs und damit den Energiegehalt der Pellets (Kapitel 2.2.2)
Cellulose	<ul style="list-style-type: none"> Große Anzahl hydrophiler Gruppen beeinflusst die Wasseraufnahme- und Wasserfreisetzungsfähigkeit des Rohmaterials (Trocknungs- und Lagereigenschaften von Roh- und Brennstoff, Kapitel 2.2.1)
Hemicellulose	<ul style="list-style-type: none"> Amorphe Struktur begünstigt die Wasseraufnahmefähigkeit des Rohmaterial, verzögert jedoch die Wasserfreisetzung und damit die Trocknungszeit der Rohmaterialpartikel (Energieaufwand Trocknung, Kapitel 2.2.1) Quell- und Klebfunktion unterstützt die Pelletierbarkeit des Rohstoffs (Bindungsfähigkeit, Kapitel 2.3.2) beeinflusst die Aufnahme von (Luft-)Feuchtigkeit und damit die Lagerfähigkeit des Brennstoffs (Kapitel 2.2.1)
Lignin	<ul style="list-style-type: none"> Natürliches Bindemittel bei der Pelletierung (Klebwirkung / Brückenbindung), beeinflusst Brennstofffestigkeit; unzureichender oder nicht mehr aktivierbarer Ligninanteil im Rohmaterial (z. B. durch lange Lagerung im Freien, hohe Trocknungstemperaturen) bedingt den Einsatz von additiven Bindemitteln zur Pelletierung, Kapitel 2.3.2, 3.2.2) Hydrophobe Struktur erhöht die Stabilität der Pellets gegenüber (Luft-) Feuchtigkeit nach dem Aushärten des Lignins im Kühler; Versiegelung der Pelletoberfläche, Kapitel 2.2.1) Hoher Ligninanteil des Rohmaterials ist an äußeren Glanz der Pellets erkennbar

Begleitstoffe / Extrakte	
Stärke, Zucker, Eiweiße	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Natürliche Klebwirkung unterstützt Bindung der Rohstoffpartikel beim Pressen ▪ Durch die Zugabe von PHM auf Stärkebasis oder Melasse wird die natürliche Konzentration der Extraktstoffe im Pressgut erhöht und u. a. die Brennstofffestigkeit der Pellets verbessert (Kapitel 2.2.1, 3.2.2, 4.1, 5.3)
Fette, Öle, Harze, Wachse	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hydrophobe Struktur erhöht die Stabilität der Pellets gegenüber (Luft-)Feuchtigkeit ▪ Fette, Öle beeinflussen durch ihre Schmier-Gleiteigenschaften die Brennstofffestigkeit und den Einsatz von Additiven zur Pelletierung (Kapitel 2.2.2.1) ▪ Natürliche Additive auf Basis harzhaltiger Substanzen bzw. pflanzlicher Paraffine unterstützen Bindung der Holzpartikel und damit die mechanische Festigkeit (Abrieb) der Pellets (Kapitel 2.3.2.2)
Mineralien, v. a. K, Ca, Na, Mg, Si etc.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aufwuchsort und Bodentyp beeinflusst anorganische Bestandteile des Rohstoffs und damit den Aschegehalt und -erweichungsverhalten der Pellets. D. h., auf kalkreichen Böden gewachsenes Holz ist tendenziell besser für die Holzpelletproduktion geeignet, als Rohmaterialien von sauren Böden, da Kalzium zur Erhöhung der Ascheschmelztemperatur beiträgt (Kapitel 3.4.2, 5.4.1) ▪ Durch mineralische Verunreinigungen (z. B. Sand, Steine) des Rohmaterials während der Lagerung oder dem Transport kann der natürliche Mineralstoffgehalt erhöht und dadurch ebenfalls das Ascheschmelzverhalten des Brennstoffs beeinflussen werden; des Weiteren tragen sie zu einem erhöhten Materialverschleiß, Wartungs- und Instandhaltungsaufwand bei (Kapitel 3.4.2, 5.4)
Ausgewählte Bestandteile	
Wasser	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Wassergehalt des Rohstoffs beeinflusst die Faserlänge / Partikelgröße beim Zerkleinern der Spanteilchen und damit die Auswahl der Zerkleinerungstechnik (Kapitel 3.2.1) ▪ Wasserzusatz zum Pressgut verbessert die Gleitfähigkeit von zu trockenem Spanmaterial und fungiert als Lösungsmittel für stärkehaltige PHM beim Pelletieren (erleichtert somit die Bildung von Festkörperbrückenbindungen) ▪ Wasser in Form von Dampf unterstützt während der Konditionierung die Bildung von Brückenbindung durch die thermische Aktivierung der rohstoffeigenen oder eingebrachten Bindemittel (geringes Wasservolumen, hoher Wärmeeintrag) und beeinflusst somit die Auswahl der PHM-Art und Dosierung (Kapitel 2.3.2, 3.2.2, 4.1, 5.3) ▪ Ein zu hoher Wassergehalt des Pressguts oder Presstemperaturen über 100°C können die physikalisch-mechanischen Eigenschaften der Pellets und insbesondere die Brennstofffestigkeit (Abrieb) mindern; die Pellets zeigen Risse, quellen auf und zerfallen; diese Qualitätsminderung kann auch bei einem inhomogenen Wassergehalt des Rohmaterials vor der Pelletierung auftreten (Kapitel 3.2.3, 5.3.1) ▪ Wassergehalt von Roh- und Brennstoff bedingt die Lagerfähigkeit des Materials, die Brennstoffmasse und deren Heizwert (Kapitel 2.2.1, 3.2.2, 5.3)
Rinde	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ein höherer Anteil an Extrakten und Lignin in Rindenholz verstärkt die damit verbundenen Wirkungen (Tabelle 2-4) ▪ Mineralstoffe und Schwermetalle (Verunreinigungen) können den Aschegehalt des Brennstoffs erhöhen und das Ascheschmelzverhalten sowie die Emissionen bei der Verbrennung der Pellets negativ beeinflussen (Kapitel 2.2.1, 3.2.2) ▪ Generell weist Spanmaterial aus Hobelwerken einen geringeren Rindenanteil im Vergleich zu Spänen aus Sägewerken (Reste der Rundholzentbindung) auf und ist somit zur Premiumpelletproduktion besser geeignet (bedarf auch geringerem Trocknungsaufwand, Kapitel 3.1, 3.2.1)

Die Einflussparameter in Tabelle 6-1 haben u. a. gezeigt, dass bei der Rohstoffauswahl zur Pelletierung neben der Holzart auch die Holzherkunft und der Aufwuchsort des Holzes einbezogen werden sollte, da die artspezifische Zusammensetzung des Rohmaterials regionalen und witterungsbedingten Schwankungen unterliegt. Dabei können im Einzelfall natürlich erhöhte Konzentrationen von Alkalien / Erdalkalien (z. B. K, Ca, Mg) und Metallen (z. B. Si, Fe, Zn, Cd, Pb) auftreten, die den Einsatz des Holzes für die Premiumpelletproduktion als kritisch bis unbrauch-

bar einstufen lassen, da sie zu technischen Problemen bei der Verbrennung in KFA führen können (Ascheschmelzverhalten, Kapitel 3.4, 5.4).

Artuntypische Abweichungen der holzspezifischen Brennstoffparameter (z. B. erhöhte N, S oder Cl-Gehalte) können aber auch ein Anzeichen für bewusste oder unbewusste Verunreinigungen / Beimischungen oder Aufwuchsbedingungen (Boden, Klima etc.) sein, beispielsweise durch Insektizide, Leime, Lacke, Holzkonservierungsstoffe oder unzulässige PHM /151/.

Ein für die stoffliche Holznutzung bedeutendes, für die Pelletproduktion eher vernachlässigbares Wissen stellt der Insektenbefall von Hölzern dar. Typisch für die kanadische Pelletproduktion ist die Beimischung oder explizite Nutzung von durch Borkenkäfer geschädigtem Frischholz. Da die Käfer nur saisonal die Bäume befallen und schädigen, ist ihr Anteil zum Zeitpunkt der Stammholzernte vernachlässigbar. Selbst die bei der Holzernte noch vorhandenen Larven können während des Pelletproduktionsprozesses aufgrund der Zerkleinerungsschritte, der technischen Trocknung und den hohen Presstemperaturen während der Pelletierung nicht überleben. Auswirkungen der organischen Substanz auf die Pelletiereigenschaften sind nicht bekannt /258/.

6.2.2 Witterungsverhältnisse, Lagerbedingungen und Lagerdauer

Das Wetter beeinflusst direkt die Oberflächenbeschaffenheit des Materials. D. h., je feiner das abgelagerte Holzmaterial (Rundholz, Hackschnitzel, Späne oder Sägemehl) ist, desto aktiver sind die biologischen Abbauprozesse, welche die molekulare Zusammensetzung des Materials verändern /105/. Hohe Luftfeuchtigkeiten und Temperaturen beschleunigen diesen Effekt zusätzlich. Bei trockenen Wetterverhältnissen verlangsamen sich dagegen die biologischen Prozessaktivitäten und können bei gleichzeitig kühlen Temperaturen nahezu aussetzen.

Bei ungeschützt gelagertem Material wird somit die Holzalterung beschleunigt und der spezifische Heizwert des Holzes sinkt, während der Anteil der aschebildenden Elemente steigt /81/. Parallel dazu, nimmt mit zunehmender Lagerdauer das Risiko einer lignin-abbauende Pilzinfektion zu (Kapitel 3.3.2). Für die Holzpelletproduktion bedeutet dies zunächst eine Verschlechterung der natürlichen Bindefähigkeit des Pressguts (Tabelle 6-1). Vorteilhaft auf den Pressdurchsatz kann jedoch der einsetzende Holzfaseraufschluss sein (Kapitel 2.3.2.2) /141/.

Neben einer beschleunigten Holzalterung können durch Niederschläge (Regen, Schnee oder Hagel) auch Verunreinigungen durch Spritzwasser vom Boden, von umstehenden Bäumen / Gebäuden oder aus der Luft in das Rohmaterial eingebracht werden (Kapitel 3.1, 5.1.1). Besonders ungünstig erweisen sich dabei ungeschützte Lagerflächen ohne Überdachung und befestigten Untergrund. In solchen Nassspanlagern kann es bei längeren Kälteperioden sogar zum Durchfrieren des feuchten Spanmaterials kommen, was zum Abbruch des kontinuierlichen Rohstoffinputs für den Pelletproduktionsprozess führen kann /107/, /242/, /208/.

6.2.3 Verunreinigungen, Störstoffe

Neben den witterungsbedingten Verunreinigungen des Rohmaterials können weitere Störstoffe vorkommen. Sie bewirken Abweichungen von den charakterisierenden Eigenschaften des Brennstoffs, die sich nicht auf natürliche Ursachen zurückführen lassen (Kapitel 6.2.1).

- **Chemische / biologische Verunreinigungen.** Dazu zählt der Eintrag von belasteten festen, flüssigen oder gasförmigen Stoffen ins Material, in deren Folge es zu Störanfälligkeiten der Anlage, Korrosionsschäden in der Feuerungs- und Abgasanlage (z. B. durch Chlor- und Schwefelverbindungen) sowie zu Problemen bei der Einhaltung der Emissionsgrenzwerte oder Gesundheitsrisiken (Schimmelpilze) kommen kann.

Beim Einsatz von direkt beheizten Trocknern kann es zu einer Ablagerung bzw. Aufkonzentration der im Abgasstrom mitgeführten Schadstoffe (aus der Verbrennung von fossilen oder regenerativen Brennstoffen) auf dem Spanmaterial kommen (Kapitel 3.2.1).

Darüber hinaus stellt in Deutschland die Nutzung oder Beimischung von Altholz zur Pelletproduktion für KFA eine Verunreinigung des Rohmaterials dar – unabhängig davon, ob tat-

sächlich eine chemische Belastung des Materials vorliegt (Kapitel 2.1.1, 3.1). Von Pilzen, Pilzsporen oder Bakterien befallenes Holz gilt als biologisch verunreinigtes Material und darf damit ebenfalls nicht für die Premiumpelletproduktion verwendet werden (Kapitel 6.2.2).

Die vollständige Separierung von chemisch oder biologisch verunreinigtem Material ist jedoch nur bei einer kontinuierlichen Kontrolle der Stoffströme und dem konsequenten Ausschluss der gesamten betroffenen Roh- oder Brennstoffcharge möglich. Um den damit verbundenen hohen personellen und ökonomischen Aufwand zu vermeiden, sollte die Möglichkeit des Eintrages von kontaminiertem Material bzw. der Kontamination vor Ort weitestgehend ausgeschlossen werden.

- **Mechanische Verunreinigungen.** Als mechanische Verunreinigungen werden Steine, Erden, metallische Absplitterungen von Ernte- und Bearbeitungswerkzeugen oder sonstige Fremdkörper im Material (Kunststoffe, Nägel, Munitionsreste etc.) definiert. Sie können sowohl während der Pelletproduktion als auch während der Brennstoffnutzung technische Schäden z. B. an Messern (Zerkleinerung), synthetischen Materialien wie dem Spantransportband im Bandtrockner, in der Presse oder in Brennstofffördersystemen verursachen, die u. a. zum Anlagenstillstand führen. So kann z. B. ein Eintrag von Sand ins Brennmaterial (Si) zu Verschlackungen im Feuerraum führen (Absenkung der Ascheschmelztemperatur) und dadurch die automatische Ascheaustrag aus der Brennkammer blockieren (Kapitel 3.4.2, 5.4).

Derartige Verunreinigungen des Roh- und Brennstoffs sind während der gesamten Prozesskette der Holzpelletbereitstellung nicht gänzlich auszuschließen. Ein konsequentes Qualitätsmanagement während der Rohmaterialbereitstellung, -verarbeitung und Brennstofflogistik kann den Fremdkörpereintrag jedoch weitestgehend reduzieren (z. B. Ausschluss von Rinde und Wurzelhölzern im Produktionsprozess, Reinigung der Transportfahrzeuge vor der Befüllung). Zusätzlich wird mit Hilfe von technischen Verfahren versucht, vor der Pelletierung möglichst alle potenziellen Störstoffe aus dem zerkleinerten Rohmaterial auszuschleusen; dafür werden beispielsweise magnetische und elektrische Metallabscheider sowie Steinfallen verwendet (Kapitel 3.2.1) /208/.

Bei der Verwendung von Frischhölzern in der Pelletproduktion ist das Risiko des Fremdkörpereintrages höher, da durch Niederschläge und Ernteprozesse (Fällen, Rücken, Lagern, Transport) Bodenmaterial und Schmutz leicht mit den Rohstoff ins Pelletwerk weiter getragen werden kann. Aus Sicht der Qualitätssicherung von Pellets sollte deshalb die Entrindung und Zerkleinerung von Rundhölzern erst im Pelletwerk erfolgen, um die Möglichkeiten des Fremdkörpereintrages zu minimieren. Weiterhin stellen für die Premiumpelletproduktion auch Nadeln und Blätter eine Rohmaterialverunreinigung dar, die besonders bei der Verwendung von Waldrestholz oder KUP gezielt ausgeschlossen werden muss (Kapitel 3.1).

Eine Möglichkeit zur Kompensation von chemisch / biologisch oder mechanisch verunreinigten Material ist seine Verdünnung mit qualitativ hochwertigem /sauberen Spanmaterial, um damit eine Verbesserung der Gesamtmenge zu erzielen. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass gerade in KFA auch punktuelle Verunreinigungen des Brennstoffs zur Versinterung und zu Verschlackungsproblemen führen können (Kapitel 2.2.2.2, 5.4). Deshalb ist die Verwendung von Waldrestholz und KUP nur anteilig für die Produktion von A2-Holzpellets und für A1-Pellets gar nicht zulässig (Anhang, Tabelle A-3). Feuerungsanlagen im höheren Leistungsbereich besitzen in der Regel eine robustere technische Ausstattung der Brennkammer und stellen deshalb geringere Brennstoffanforderungen hinsichtlich des Verunreinigungsgrades /252/, /253/.

6.2.4 Auswahl und Funktionalität technischer Verfahren und Aggregate

Bei der Pelletbereitstellung können in jeder Prozessstufe und jedem Einzelprozess (Abb. 4-1, Abb. 6-1) unterschiedliche technische Aggregate identifiziert werden, die Einfluss auf die Endprodukteigenschaften nehmen. So bieten allein im Prozessabschnitt der Brennstoffproduktion die Art und Effektivität der Holzzerkleinerung, der Spantrocknung, der Konditionierung, Pelletierung, Kühlung und Absiebung sowie schließlich auch der Abpackung bzw. Verfüllung der Pel-

lets zum Abtransport alle ein oder mehrere Einflussmöglichkeiten, um zur Erfüllung der jeweils geforderten Brennstoffeigenschaften oder zu deren Grenzwertüberschreitungen beizutragen.

Somit wird durch die Auswahl des Typs (z. B. Band- oder Trommeltrockner) und dessen Funktionsweise (z. B. Basismodell oder inklusiv Hightech-Mess- und Regelungstechnik) der jeweiligen Systemkomponente sowie der Betriebsparametereinstellungen (Sollwerte) immer auch auf die Brennstoffeigenschaften Einfluss genommen.

Nachfolgend wird deshalb nur beispielhaft die Bedeutung der Auswahl und Funktionstüchtigkeit einzelner Prozesskomponenten erläutert, wobei die technische Prozesskettenbeschreibung in Kapitel 3, die Ableitung der Einflussoptionen auf die Brennstofffestigkeit in Kapitel 4.1 und ergänzende Literaturstudien (/104/, /105/, /106/, /107/, /108/, /127/) weitere Beispiele aufzeigen.

- **Spanntrocknung.** Um die Funktionstüchtigkeit eines Bandtrockners zu kontrollieren, wird die Spanfeuchtigkeit am Bandaustritt automatisiert messtechnisch überwacht und damit die Bandgeschwindigkeit bzw. die Trocknungstemperatur geregelt (Kapitel 3.2.1, Abb. 3-5). Sollte die Funktion der Feuchtigkeitssensoren gestört sein (z. B. durch Verschmutzung) bzw. ihr Toleranzbereich nicht der maximal kompensierbaren Schwankungsbreite durch die nachgeordneten Aggregate entsprechen, werden nur unzureichend getrocknete Späne oder inhomogene Spanqualitäten erreicht. Dies kann dazu führen, dass die Brennstoffanforderungen an Premiumpellets u. a. hinsichtlich Wassergehalt und Brennstofffestigkeit nicht mehr erfüllbar sind.

Weiterhin wird die Durchsatzleistung von Bandtrocknern in der Regel von den Außentemperaturen beeinflusst, weshalb die Einbeziehung der Standortverhältnisse bei der Planung wichtig ist. Wird der Trockner nur für durchschnittliche Winter-/ Sommertemperaturen ausgelegt, werden zwar Überschusskapazitäten (bzw. Kapazitäten mit geringer Auslastung) eingespart, an sehr kalten Wintertagen kann es jedoch zu reduzierten Durchsatzleistungen der Spanntrocknung kommen und im Extremfall sogar zum Ausfall des Trockners. Damit verbunden ist das Risiko eines Produktionsstillstandes des Pelletwerks.

- **Pelletkühlung.** Ein ähnliches Problem der Temperaturabhängigkeit kann bei der Pelletkühlung auftreten, wobei hier eher hohe Außentemperaturen die Durchsatzleistung des Kühlers einschränken. Die häufig eingesetzten Gegenstromkühler werden in der Regel mit Außenluft oder Umluft aus der Produktionshalle betrieben. Die heißen Pellets aus der Presse sollen auf mindestens 25°C bzw. Umgebungstemperatur abkühlen (Kapitel 3.2.3). Das Aushärten der Pellets erfordert somit Zulufttemperaturen zum Kühler von deutlich unter 25°C. Können diese nicht gewährleistet werden, bedeutet dies längere Verweilzeiten der Pellets im Luftstrom, was sich ebenfalls auf die spezifische Produktionsleistung der Anlage auswirkt.

Die Erhöhung des Zuluftvolumenstroms im Kühler kann dies zu einem gewissen Grad kompensieren, verursacht jedoch durch die erhöhte Luftaustauschrate auch mehr Verwirbelungen und damit mehr Reibung der Pellets untereinander und mit der Kühlkammerwand. Durch die mechanische Belastung steigen der Pelletbruchanteil und somit auch der Feinanteil im Schüttgut. Mit der Installation einer technischen Kühlung (z. B. Absorptionskältemaschine) könnte der Wetterabhängigkeit entgegengewirkt werden; dem gegenüber steht jedoch ein hoher Investitionsaufwand.

6.2.5 Lager- und Transportkonditionen sowie Umschlaghäufigkeit

Nahezu alle Handlungen während Lagerung, Transport und Umschlag des Rohmaterials sowie der Pellets können bei einem unsachgemäßen Umgang die brennstoffspezifischen Eigenschaften beeinflussen (z. B. Rohmateriallagerung ohne Überdachung und festem Untergrund, Feuchtigkeitseinbruch in Pelletlager, häufiges Umlagern von Pellets oder sehr holprige lange Transportstrecken). In Folge dessen kann es u. a. zu einer Erhöhung des Wassergehalts, der Pelletstückigkeit und des Feinanteils im Material oder zu Verunreinigungen kommen. Parallel dazu besteht bei unsachgemäßer Lagerung die Gefahr der Reduzierung des Energiegehalts (biologischer Zerfall), der Verringerung der Brennstofffestigkeit und somit auch der Schüttdichte der Pellets (Ka-

pitel 2.2.2, 3.3, 5.5). Je nachdem wie häufig ein Transport und die Ablagerung des Rohmaterials und des Brennstoffs erfolgt, desto größer ist das Risiko die Brennstoffeigenschaften negativ zu beeinflussen (Kapitel 6.2.3). Lediglich der Feinanteil im Pelletschüttgut kann durch eine Absiebung des Brennstoffs nach dem Umschlag bzw. der Lagerung wieder reduziert werden, verursacht jedoch Materialverluste.

Besonders kritisch sind somit Einwirkungen auf den Brennstoff nach der letzten Absiebung der Pellets vor der Auslieferung an den Endkunden zu sehen. Um deren Ausmaß zu minimieren stellt u. a. die Zugänglichkeit des Brennstofflagers für die Anfahrt mit Transportfahrzeugen zur Lieferung von Sackware, BigBags oder lose Ware eine essentielle Voraussetzung dar. Bereits beim Bau eines Brennstofflagers beim Endkunden, welches zur Anlieferung von losen Pellets geeignet sein soll, muss u. a. darauf geachtet werden, dass die Befahrung mit einem entsprechenden Pellettransportfahrzeug möglich ist (Kapitel 3.3.1). Weiterhin sollte der Befüllstutzen des Endkunden-Lagerraums möglichst in unmittelbarer Nähe und gut erreichbar für den Einblassschlauch sein. Nur so sind kurze Schlauchwege ohne unnötige Krümmungen und die schonende Einblassung der Pellets in den Lagerraum möglich, womit die Erhöhung des Feinanteils im Schüttgut durch den Prozess der Brennstoffauslieferung minimiert wird /11/, /35/, /40/, /41/, /77/.

6.2.6 Qualifikation der Akteure

Auch dem personellen Faktor wird eine hohe Bedeutung zugeordnet, und dies sowohl seitens der an der Pelletbereitstellung beteiligten Akteure als auch seitens des Endnutzers. Beispielhaft werden nachfolgend Situationen beschrieben in denen der Einflussfaktor Mensch deutlich wird.

Aufgrund der Wettbewerbssituation auf dem Rohstoffmarkt stellt die kontinuierliche Versorgung eines Pelletwerks eine Herausforderung dar. Wenn kein direkter Holzbezug über eigene oder kooperierende Unternehmen (Firmengruppen) möglich ist, werden meist mehrere Verträge mit externen Lieferanten zur Absicherung der regelmäßigen Rohstoffanlieferung abgeschlossen. Damit stehen Rohmaterialien mit abweichenden Brennstoffeigenschaften zur Verfügung, die z. T. die gesamte Schwankungsbreite der Zulässigkeit ausschöpfen können.

Abgesehen von der permanenten Erfassung des Wassergehalts des Spanmaterials und der daraufhin automatischen Anpassung der Spantrocknung kann die Prozesssteuerung im Pelletwerk immer nur verzögert auf variierende Rohmaterialeigenschaften reagieren. Ein erfahrener Pelletierer kann dagegen bereits bei der Anlieferung die Materialeignung hinsichtlich seiner Bindefähigkeit grob einschätzen (z. B. an der Oberflächenbeschaffenheit des Rohmaterials und / oder dessen Farbe bzw. Geruch den Fortschritt des biologischen Zerfallstadiums). Er leitet daraufhin umgehend technische Kompensationsmaßnahmen ein (z. B. Regulierung der Reifezeit im Konditionierer, Zugabe von PHM), um dennoch die Produkthanforderungen erfüllen zu können. Somit kann der Pelletierer Qualitätsmängel und Fehlleistungen reduzieren oder gar vermeiden. Trotz der hohen technischen Ausstattung moderner Pelletwerke werden ohne den Eingriff eines erfahrenen Pelletierers Rohmaterialabweichung(en) erst bei einer turnusmäßigen Brennstoffanalyse³⁴ auffallen und danach entsprechend die Prozesseinstellparameter korrigiert werden.

Ein anderes Akteursbeispiel stellt der Pelletlieferant dar, dessen Einflussmöglichkeiten auf die Brennstoffeigenschaften bei der Pelletauslieferung bereits in Kapitel 6.2.5 beschrieben wurde.

Nach der Brennstoffübergabe vom Lieferanten zum Endkunden kann dieser wiederum seine Qualifikation nachweisen, indem er die Lieferung nicht nur einer visuellen Kontrolle unterzieht, sondern auch ein fachgerechtes sauberes Lager zur Verfügung stellt und geeignete Systeme zur automatisierten Brennstoffförderung bis hin zur Feuerungsanlage installiert hat. Ebenso wie bei der Auslieferung der Pellets gilt hier die Vermeidung von langen Wegen mit vielen Ecken und

³⁴ In der Praxis werden besonders wichtige Brennstoffkennwerte (wie Brennstofffestigkeit oder Wassergehalt) mit Schnelltestverfahren direkt im Pelletwerk analysiert. Die Häufigkeit dieser Analysen wird von der Produktionsmenge und dem Personaleinsatz und des individuellen Qualitätsmanagementkonzeptes bestimmt.

Höhenunterschieden, um eine Beeinflussung der Brennstoffstückigkeit, des Feinanteil im Schüttgut und somit auch der mechanischen Festigkeit des Brennstoffs zu minimieren.

Somit stellen die Personalauswahl und –qualifizierung der Akteure der Holzpelletbereitstellung, aber auch die Erfahrung und Fähigkeit des Endnutzers beim Umgang mit dem Brennstoff, einen wichtigen Einflussfaktor zur Reduktion von Fehlchargen und -leistungen dar /2/, /139/, /259/.

6.2.7 Zusammenfassung

Unter Einbezug der Erkenntnisse der Arbeit hat die Prozesskettenanalyse zu den in Abb. 6-2 dargestelltem Ergebnis geführt. Darin sind jedem Einzelprozess der Holzpelletbereitstellung ein oder mehrere Einflussfaktoren zugeordnet, die einen direkten oder indirekten Bezug auf die Brennstoffeigenschaften des Endproduktes (Holzpellets) haben. Dies heißt nicht zwingend, dass sie in jedem Fall eine positive oder negative Auswirkung verursachen. Sie können jedoch unter ungünstigen Rahmenbedingungen / Einstellungen die natürliche Schwankungsbreite der brennstoffcharakterisierenden Kennwerte der Pellets beeinflussen. Das Wissen zu den Einflussfaktoren hilft allerdings auch ungünstige Prozess- oder Rohmaterialeigenschaften während des Produktionsprozesses zu kompensieren und damit letztendlich die brennstofftechnischen Anforderungen der DINplus oder der DIN EN 14961-2 an Premiumpellets zu erreichen.

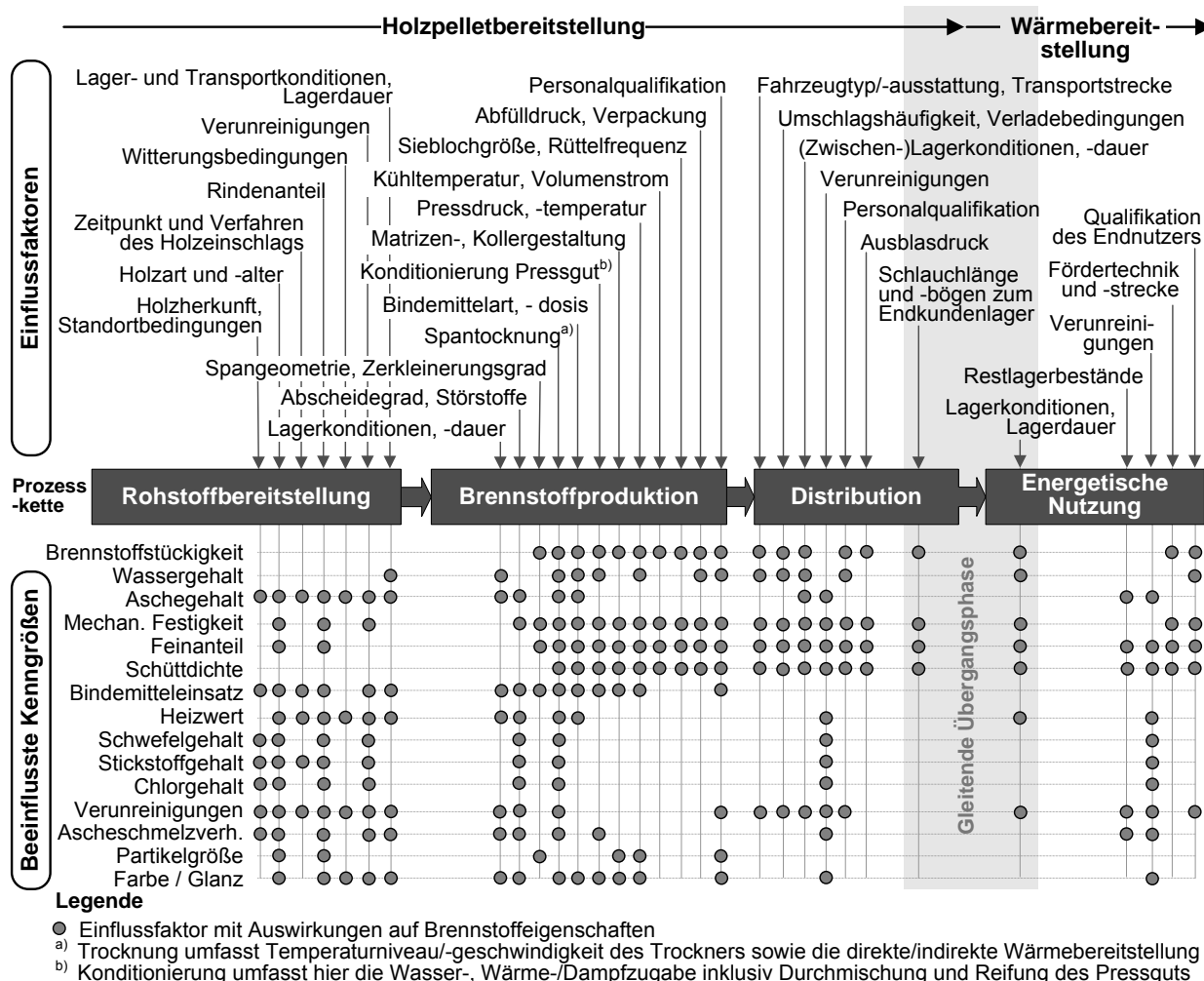


Abb. 6-2: Einflussmöglichkeiten auf ausgewählte Brennstoffeigenschaften von Holzpellets entlang der Prozesskette der Holzpelletbereitstellung bis zum Brennstoffeintrag in die Feuerungsanlage

Bei Brennstoffparametern mit einer hohen Anzahl von Einflussfaktoren entlang der Prozesskette bestehen auch mehr Möglichkeiten zur Lenkung der brennstoffspezifischen Kennwerte (z. B. mechanische Festigkeit, Feinanteil, Brennstoffstückigkeit), als bei Brennstoffparametern mit wenigen Einflussnahmeoptionen (z. B. S-/Cl-Gehalt, Partikelgröße der Späne im Pellet). Je

nachdem, wie gravierend die Einflussmöglichkeiten der Faktoren sind, sollten gezielt Brennstoffproben kontrolliert und regelmäßig (von Unabhängigen) überwacht werden, um die Einhaltung der jeweiligen Brennstoffanforderungen garantieren zu können.

Für die praktische Umsetzung dieser Maßnahmen kann beispielsweise die Qualitätssicherungsnorm für Holzpellets der EN 15234-2 herangezogen werden (/191/ bzw. Anhang, Kapitel A.5). Alternativ dazu werden in den Leitfäden zu Qualitätssicherung von Holzpellets im Rahmen von Zertifizierungssystemen typische Kontrollpunkte für die Prüfung bzw. messtechnische Überwachung spezifischer Brennstoffeigenschaften benannt (/34/, /42/).

6.3 Bewertung der Einflussfaktoren auf die Brennstofffestigkeit

In Tabelle 6-2 erfolgt ausschließlich die Bewertung der in Kapitel 6.2.7 identifizierten Einflussfaktoren auf die Brennstofffestigkeit von Holzpellets entsprechend der beschriebenen Vorgehensweise in Kapitel 6.1. Die Einflussfaktoren der Pressgutkonditionierung und der Pelletierungen werden dabei (wie in Abb. 6-2) für jeden Einzelprozess separat beurteilt, um die multifunktionale Lenkungswirkung der Prozesse zu verdeutlichen, d. h. die Möglichkeit zur Steigerung oder Minderung der Brennstofffestigkeit. Dagegen werden vergleichbare Einflussfaktoren, die an mehreren Stellen der Prozesskette wirken, zusammengefasst betrachtet. Dabei handelt es sich um den Wassergehalt des Spanmaterials, die Qualifikation aller beteiligten Akteure (Produzenten, Lieferanten, Endverbraucher etc.), den Transport und die Lagerung des Brennstoffs sowie den Einfluss von Verunreinigungen und Störstoffen in der Prozesskette.

Tabelle 6-2: Bewertung der Möglichkeiten zur Beeinflussung der Brennstofffestigkeit von Holzpellets

Einflussfaktor	Möglichkeiten			Anmerkungen zur Bewertung
	natürlich/ rohstoffbedingt ^{a)}	technisch ^{b)}	management- bedingt ^{c)}	
Holzart, -alter	1	0,5	1	Rohmaterialauswahl wird vor allem von Verfügbarkeit (Markt, Region, Saison) und Preis sowie der Eignung des Holzes für vorhandene Prozesskomponenten im Pelletwerk bestimmt
Ligningehalt, Rindenanteil	1	0,5	0,5	rohstoffbedingt; Entrindungsgrad (Säge- oder Hobelspäne); Witterungseinfluss, Lagerdauer /-konditionen managebar
Wassergehalt Spanmaterial	1	0,5	0,5	vom Holzsortiment (SNP, Frischholz), dem Zeitpunkt des Holzeinschlags, der Witterung und Lagerdauer abhängig; Homogenität der Spanqualität durch Mischung korrigierbar
Spangeometrie, Zerkleinerungsgrad	0,5	1	0,5	technische Auswahl Zerkleinerer; Gewährleistung homogener Rohmaterialzufuhr (Materialstruktur / Faserlänge, Wassergehalt)
Spantrocknungs- temperatur	1	1	0,5	abhängig vom Wassergehalt und Stückigkeit des Rohmaterials, der Trocknerauslegung (verfügbarem Wärmeniveau am Standort / Trocknertechnologie) und der Außentemperatur
Verunreinigungen, Störstoffe	0,5	1	1	Restrindenanteile / Mineraliengehalt im Rohmaterial bedingt beeinflussbar; Effektivität der Abscheidertechnik (Steine, Metalle), direkte oder indirekte Trocknungstechnik; vorbeugend mechanische und chemische Verunreinigungen ausschließen (z. B. in Lagern, Fahrzeugen, Verpackungen)
Wassergehalt Press- gut	0	1	1	problematisch bei unzureichender Spantrocknung; Befeuchtung Stand der Technik und gut dosierbar, Homogenisierung wichtig
Wärme-/ Dampfzu- gabe	1	1	0,5	Verfügbarkeit von Dampf bei Standortwahl; Wirkungseffekt der Konditionierungsmaßnahmen von Rohstoffeigenschaften abhängig, Temperaturniveau / Menge regulierbar

Bindemitteltyp / -sorte	1	1	0,5	Auswahl zulassungsbeschränkt; Konsistenz auf Zumischtechnik abzustimmen (Dosierung); Verfügbarkeit technischer Möglichkeiten zur Aktivierung der Bindungskräfte (Konditionierung)
Bindemittelkonzentration/-dosis	1	0	1	natürliche Konzentration der Bindekräfte nach Auswahl des Typs gegeben; Dosis im Rahmen der Zulassungsbeschränkung variabel
Mischungsgrad Pressgut / Reifezeit	1	1	0,5	abhängig von Pressguteigenschaften /-konsistenz, technischer Ausstattung zur Homogenisierung; zeitliche Einschränkung des Reifeprozesses (Effizienz der Produktion)
Matrizen-/ Kollergestaltung	0	1	0,5	Gestaltung der Presskomponenten, Bohrlochgeometrie / Kanallänge; regelmäßige Aufbereitung der Koller / Matrizie
Presstemperatur	1	1	0,5	technische Ausstattung der Presse (Kühlmöglichkeiten); Pressguteigenschaften (Konsistenz, Geschmeidigkeit); Pressdruck
Pressdruck	1	1	0	Pelletpresse wird mit konstanter Kraft betrieben, um SOLL-Werte (Festigkeit) zu erreichen; Pressguteigenschaften /-konsistenz und Matrizen-/ Kollerkonstruktion bestimmen Durchsatzleistung
Kühltemperatur und Volumenstrom	0,5	1	0,5	technische Eignung Kühler; Temperatur des Zuluftstroms von Außentemperatur (Witterung) / Umluft abhängig; Abkühlungsgeschwindigkeit technisch steuerbar bei zeitlichen Einschränkungen
Pelletsiebung, Ab- füllung/Verpackung	0	1	0,5	automatisierte Prozesse, Abfüllvolumenstrom (Druck) beeinflusst Pelletbruch (Feinanteil, Stückigkeit), zeitliche Einschränkungen
Brennstofftransport und -lagerung	0	1	1	Fahrzeugtyp, Transportweg, Umschlagshäufigkeit (logistische Koordination); Schutz vor Feuchtigkeit; Absiebung vor Auslieferung
Auslieferung an Endkunden	0	1	1	Zugänglichkeit des Grundstücks; Einblasbedingungen (Staubabzug, Prallschutzmatte, Ausblasdruck etc.)
Brennstoffförder- technik /-strecke	0	1	1	Auswahl geeigneter mechanischer oder pneumatischer Fördersysteme, Konstruktion der Fördersysteme (u. a. Durchmesser); Begrenzung der Länge der Förderstrecke zwischen Lager und Kessel
Qualifikation der Akteure	1	1	1	beeinflusst durch persönliches Interesse (natürlich); Ausbildung / Qualifikation (technisch); Einsatz-, Wartungs- und Instandhaltungsplanung / Verfügbarkeit ausreichender Ressourcen (managementbedingt)

Bewertungsgrößen: 0 = kein Einfluss, 1 = Einfluss, 0,5 = z. T. Einfluss gegeben, wenn bestimmte Rahmenbedingungen erfüllt werden können oder der Einfluss ist sehr eingeschränkt

^{a)} natürliche bzw. rohstoffbedingte Optionen kennzeichnen die gegebenen Eigenschaften der beteiligten Materialien, Akteure, Randbedingungen (z. B. Wetter, Klima)

^{b)} technische Optionen kennzeichnet die Funktionsfähigkeit der technischen Aggregate, ihre Abstimmbarkeit aufeinander sowie die Möglichkeiten variable und möglichst automatisiert auf abweichende Inputparameter, Randbedingungen reagieren zu können

^{c)} managementbedingte Optionen stellen die bewusste Auswahl von geeigneten Materialien und Technik dar sowie die Vorgaben an die Regelungstechnik (SOLL-Werteinstellung); in die Entscheidungen der Akteure fließen gesetzliche Beschränkungen sowie strukturelle, qualitative, zeitliche und ökonomische Vorgaben / Randbedingungen ein

Insgesamt können mindestens 20 unterschiedliche Einflussfaktoren die Brennstofffestigkeit während der Holzpelletbereitstellung bis zum Einsatz in einer Feuerungsanlage beeinträchtigen. Während die Einflussoptionen entlang der Prozesskette bis zum Austritt der Pellets aus dem Kühler sowohl positive als auch negative Lenkungswirkungen haben, stellen nahezu alle Einflussfaktoren danach nur noch eine Minderung der Brennstofffestigkeit dar (Abb. 6-2). Zumindest teilweise kann dieser Effekt durch den Ausschluss des Feinanteils bei der Absiebung der Pellets an kritischen Übergabepunkten (nach Pelletierung, Lagerung etc.) korrigiert werden.

Abb. 6-3 und Abb. 6-4 zeigen die Ergebnisse der Bewertung aus Tabelle 6-2 für jeden Einflussfaktor. Aus der prozentualen Aufsplittung der Einflussnahmemöglichkeiten in Abb. 6-3 wird deutlich, dass die technischen Lenkungsmaßnahmen die vielfältigsten Optionen zur Beeinflussung der Brennstofffestigkeit von Holzpellets bieten. Entsprechende Maßnahmen können jedoch

wirkungsvoll umgesetzt werden, wenn auch die natürlichen / rohstoffbedingten und managementbedingten Randbedingungen gegeben sind. Eine weitere Voraussetzung stellt die Funktionsfähigkeit der Aggregate dar (Kapitel 6.2.4). Der technischen Planung, Wartung und Instandhaltung eines Pelletwerks kommt damit eine besonders hohe Bedeutung zu, um während des Produktionsbetriebs die gewünschten Brennstoffeigenschaften zu erzielen. Dabei muss auch die Schwankungsbreite der Eingangsparameter (z. B. Rohstoff-/ Pressgutwassergehalt und Temperaturen) für jedes Aggregat berücksichtigt werden. Mit der Installation messtechnischer Vorrichtungen an geeigneten Kontrollpunkten kann eine weitestgehend automatische Prozessanpassung erfolgen /127/, /190/. Da es bis dato jedoch nur eine begrenzte Auswahl an geeigneten Messgeräten und –verfahren gibt, werden die Einstellparameter der technischen Prozesskomponenten in periodischen Abständen überprüft und ggf. manuell adaptiert. Damit wird auch die insgesamt nahezu gleichrangige Bedeutung der natürlichen / rohstoffbedingten und managementbedingten Einflussmöglichkeiten auf die Brennstofffestigkeit deutlich. Trotz der – im Vergleich zu den technischen Möglichkeiten – begrenzten Menge an Eingriffsmöglichkeiten in den Holzpelletbereitstellungsprozess, kann ihre Lenkungswirkung eine genauso ausschlaggebende Wirkung erzielen, wie die technischen Optionen bieten.

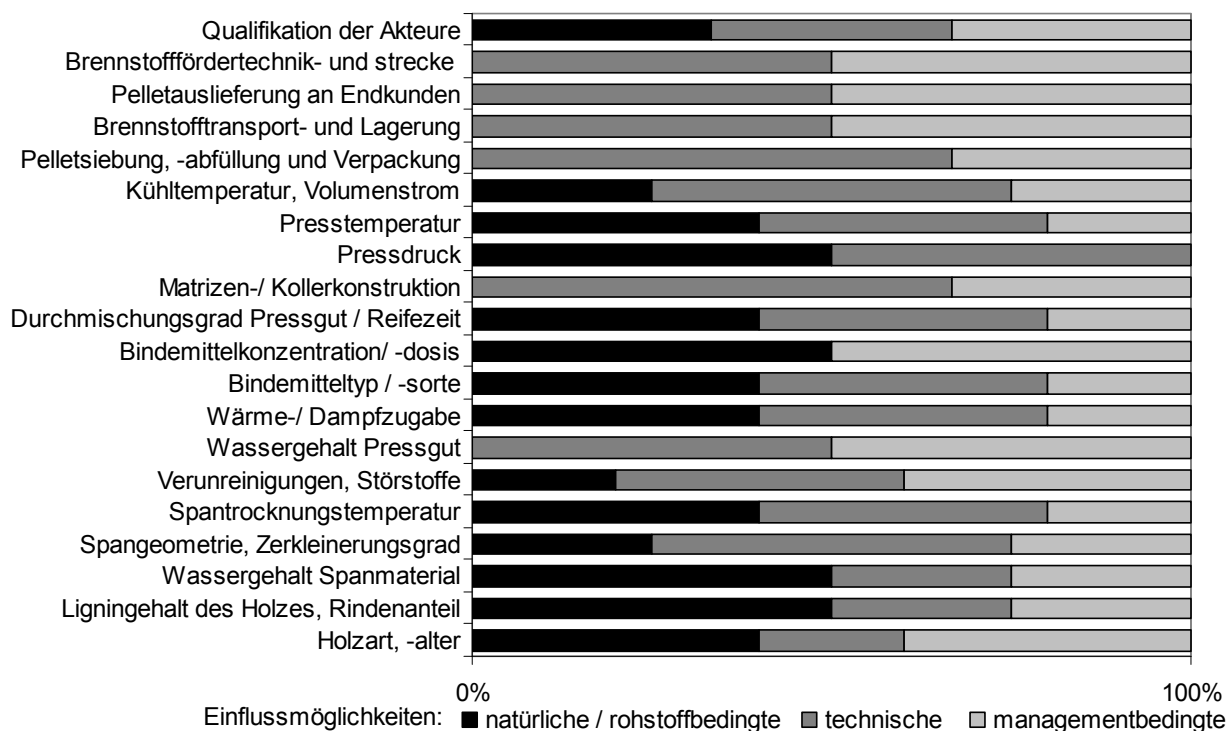


Abb. 6-3: Möglichkeiten zur Lenkung der Brennstofffestigkeit von Holzpellets (0 % = keine Möglichkeit; 100 % = Möglichkeiten gegeben, wobei unterschiedlich viele und unterschiedlich wirksame Optionen zur Verfügung stehen)

Für die kumulative Ergebnisdarstellung in Abb. 6-4 werden die natürlichen / rohstoffbedingten, technischen und managementbedingten Bewertungsgrößen jedes Einflussfaktors addiert, um die Parameter mit den vielfältigsten Lenkungsmöglichkeiten auf die Brennstofffestigkeit von Holzpellets, aufzuzeigen.

Den größten Handlungsspielraum entlang der Prozesskette haben demnach die Personen (Akteure) die während der Holzpelletbereitstellung direkt oder indirekt auf die brennstoffspezifischen Eigenschaften des Endprodukts einwirken können. Dies umfasst sowohl die Rohmaterialbereitstellung, die Pelletproduktion, als auch den Transport und die Auslieferung der Pellets. Letztendlich kann bis zum Endnutzer die Brennstofffestigkeit der Pellets durch den unsachgemäßen Umgang mit dem Brennstoff gemindert werden (Kapitel 6.2.6). Wenn die rohstoffbedingten oder technischen Randbedingungen (z. B. unzureichender Ligningehalt des Spanmaterials oder der

Spantrocknungskapazitäten) jedoch nicht vorhanden sind, können Managementmaßnahmen allein auch nicht die Endproduktqualität korrigieren.

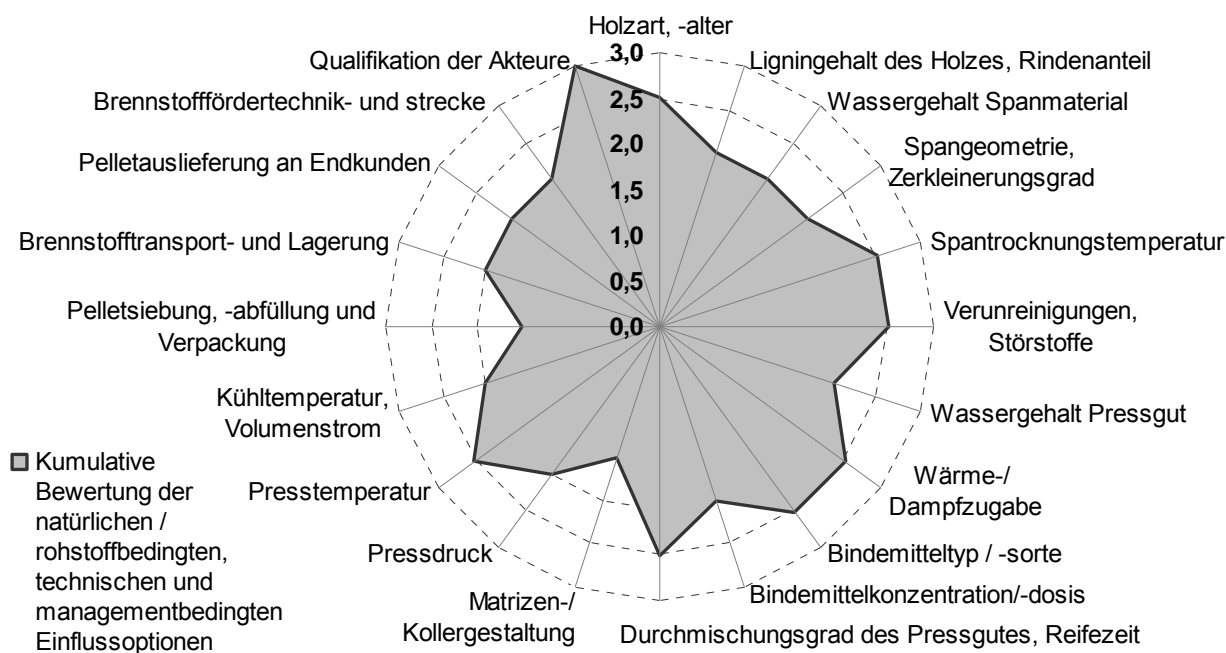


Abb. 6-4: Bedeutung der Einflussfaktoren zur Lenkung der Brennstofffestigkeit von Holzpellets

Der Konditionierungsprozess ist der Prozessabschnitt mit den meisten verschiedenen Einflussfaktoren (Wassergehalt des Pressguts; Auswahl der Bindemitteltyp /-sorte, Bindemittelkonzentration/-dosis; Wärme-/Dampfeinbringung, Durchmischungsgrad / Reifezeit des Pressguts) und den vielfältigsten Möglichkeiten auf das Pressgut so einzuwirken, dass die bestmöglichen Voraussetzungen für die angestrebte Brennstofffestigkeit geschaffen werden. Der anschließende Pelletierungsprozess des Materials in der Presse kann mit der zweithöchsten Anzahl an unterschiedlichen Einflussfaktoren (Matrizen-/Kollergestaltung; Pressdruck; Pellettemperatur) noch einmal korrigierend bzw. ergänzend auf das Material einwirken. Allerdings bietet die Auswahl eines geeigneten Rohmaterials zur Pelletierung vergleichbar viele Einflussfaktoren (Holzart/-alter; Ligningehalt; Wassergehalt) und Möglichkeiten die Pelletfestigkeit durch die Bereitstellung eines Rohmaterials mit möglichst guten Pelletiereigenschaften zu optimieren.

Die in Tabelle 6-2 durchgeführte und in Abb. 6-4 zusammengefasste Bewertung der Einflussfaktoren (Einzelprozesse) hinsichtlich ihrer Bedeutung auf die Brennstofffestigkeit von Holzpellets mit geeigneten Maßnahmen einwirken zu können, stellt keine Wichtung der Faktoren dar. Dennoch wird aufgrund der Vielfalt an existierenden Einflussmöglichkeiten der Auswahl eines geeigneten Rohmaterials, dem Prozessabschnitt der Rohmaterialkonditionierung und der Pelletierung eine besonders hohe Bedeutung zugeschrieben. Mit der Beimischung ausgewählter Bindemittel während der Pressgutkonditionierung wird eine Möglichkeit zur Optimierung der Brennstofffestigkeit geboten. Dagegen bieten die Einflussfaktoren der Matrizen-/ Kollerauswahl der Pelletpresse oder die Pelletabsiebung deutlich weniger Eingriffsmöglichkeiten die Brennstofffestigkeit zu verbessern.

7 SCHLUSSBETRACHTUNG

Als Resümee der Arbeit stellt Kapitel 7.1 die Erkenntnisse zur Themenstellung „Holzpelletbereitstellung für Kleinfeuerungsanlagen, Charakterisierung der Einsatzstoffe und ausgewählter prozesstechnischer Möglichkeiten zur Beeinflussung der Brennstoffeigenschaften – unter besonderer Berücksichtigung der Brennstofffestigkeit“ vor. In Kapitel 7.2 werden noch offene Fragestellungen zur Thematik benannt und weiterer Forschungsbedarf skizziert.

7.1 Zusammenfassung der Erkenntnisse

Der Einsatz von Holzpellets in Kleinfeuerungsanlagen (KFA) ist in den vergangenen Jahren kontinuierlich gewachsen. Holzpellets sind im Vergleich zu fossilen Brennstoffen wie Kohle, Erdgas, und Heizöl – aber auch zu anderen biogenen Brennstoffen wie Scheitholz oder Hackschnitzel – ein relativ moderner Brennstoff. Aus diesem Grund sind das Wissen und die Erfahrungen mit dem Brennstoff teilweise als lückenhaft zu bezeichnen. Treten in diesen Zusammenhang Schwierigkeiten bei der Verbrennung von Holzpellets auf, gestaltet sich die Ursachensuche nicht immer einfach (Kapitel 1.1).

Die Brennstofffestigkeit beeinflusst sowohl die Bruchneigung der Pellets beim Transport, dem Umschlag und der Lagerung und wirkt sich dadurch auch auf die durchschnittliche Pelletlänge (Brennstoffstückigkeit) und den Feinanteil des Schüttguts aus (Abrieb).

Vor diesem Hintergrund ist es das Ziel dieser Arbeit, eine Prozesskettenanalyse der Holzpelletbereitstellung unter Einbeziehung theoretischer und praktischer Untersuchungen durchzuführen. Dabei steht die Identifikation von Einflussfaktoren auf die Brennstofffestigkeit und die Auswirkungen des additiven Bindemittleinsatzes bei der Produktion von Holzpellets für KFA im Fokus der Untersuchungen.

Zur Zielerreichung werden zunächst die Rahmenbedingungen und gesetzlichen Anforderungen an den Brennstoff diskutiert. Anhand einer systematischen Analyse entlang der Prozesskette der Holzpelletbereitstellung zur energetischen Nutzung erfolgt daraufhin die Untersuchung der Einflussmöglichkeiten der Einsatzstoffe und ausgewählter Prozesskomponenten auf Veränderungen der brennstoffspezifischen Eigenschaften (Kenngrößen). Neben theoretischen Betrachtungen werden praxisnahe Tests zur Pelletierung von Versuchsbrandstoffen mit unterschiedlichen Bindemitteln und Konditionierungsmaßnahmen in einem konventionellen Pelletwerk durchgeführt und anschließend analysiert. Da in der Vergangenheit mehrfach Probleme durch die Verschlackung von Holzpellets in handelsüblichen Kesselanlagen auftraten (Abb. 1-3), wird parallel dazu geprüft, ob die Konditionierungsmaßnahmen der Einsatzstoffe während der Brennstoffproduktion eventuell das Ascheschmelzverhalten des Brennstoffs beeinflussen. Aus den Untersuchungsergebnissen ableitend werden relevante Einflussfaktoren identifiziert, die eine Lenkungswirkung (sowohl positiv als auch negativ) auf die normativen (und einige informative) Brennstoffparameter von Holzpellets zum Einsatz in KFA haben, um abschließend besagte Faktoren mit einem Einfluss auf die Brennstofffestigkeit zu bewerten.

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Untersuchungen zusammenfassend vorgestellt. Für die Herstellung von Holzpellets zum Einsatz in KFA wird zu mindestens 98 % naturbelassenes und nahezu rindenfreies Holz eingesetzt. Die Bereitstellung von geeignetem Rohmaterial stellt auf einem Markt, mit begrenzt vorhandenen Ressourcen und steigenden Nutzungskonkurrenzen, eine zunehmende Herausforderung dar. Hinzu kommt, dass zur Holzpelletproduktion nur Rohmaterialien eingesetzt werden dürfen, die den gesetzlichen Vorgaben der 1. Bundesimmissionsschutzverordnung (1. BImSchV) entsprechen. Zusätzliche Brennstoffanforderungen werden von Produktnormen, Qualitätssicherungssystemen und zukünftig voraussichtlich auch von Nachhaltigkeitsverordnungen definiert, an denen sich die Hersteller von KFA und Pelletproduzenten orientieren. Durch die kontinuierliche Novellierung und Neufassung dieser Regelwerke (u. a. 1. BImSchV, RED, EN 14961-2, DIN*plus*, EN*plus*) steigen die Brennstoffanforderungen an Holzpellets – beispielsweise auch hinsichtlich der Brennstofffestigkeit oder des Aschegehalts.

Um diesen höheren Ansprüchen gerecht zu werden, muss die vorhandene Brennstoffproduktionstechnik angepasst und die Akteure der vor- und nachgelagerten Prozessschritte zunehmend in die Qualitätssicherung des Brennstoffs eingebunden werden (Abb. 4-1).

So stellt die zunehmende Spezifizierung der Einsatzstoffe zur Holzpelletproduktion – hinsichtlich ihrer Herkunft / Anfallort und der charakteristischen Rohstoffeigenschaften – eine Grundlage zum Verständnis des Brennstoffs und des Pelletierprozesses dar. Die Ergebnisse der Arbeit zeigen, dass sich nicht nur die Eignung eines Rohmaterials zur Pelletproduktion aus dem Wissen ableiten lässt, sondern auch eine Abschätzung der mechanisch-physikalischen bzw. chemisch-stofflichen Brennstoffeigenschaften – einschließlich Aschegehalt sowie Ascheschmelzverhalten – ermöglicht.

Die Fähigkeit des holzeigenen Bestandteils Lignin den Zusammenhalt der Spanteilchen nach der Pelletierung durch die Bildung von Brückenbindungen zu unterstützen ist bekannt. Sind keine ausreichenden Mengen an aktivierbaren natürlichen Bindemitteln im Pressgut vorhanden, werden Additive zugeführt, um eine ausreichende Brennstofffestigkeit zu erzielen. Der Einsatz stärkehaltiger Binde- oder Presshilfsmittel (PHM) in Pulverform auf Getreide- oder Kartoffelbasis ist ein gängiges Verfahren in der Praxis, wurde jedoch im Rahmen ihrer ganzheitlichen Auswirkungen auf die Holzpelletbereitstellung bis hin zum Brennstoffeinsatz zur energetischen Nutzung noch nicht abschließend wissenschaftlich beleuchtet. Ihre Fähigkeit zur Agglomeration wird nicht nur von der Art und Dosierung des PHM bestimmt sondern auch von der Verfügbarkeit eines Lösungsmittels eines individuellen Temperaturniveaus in dem das PHM seine Quell- und Klebwirkung aktivieren kann sowie von der Verweildauer des PHM in der Suspension. Während des Holzpelletproduktionsprozesses wird deshalb durch Konditionierungsmaßnahmen versucht, den natürlich vorhandenen Bindemitteln sowie den verwendeten PHM durch den Zusatz von Wasser und / oder Wärme ein möglichst ideales Klima zur Entfaltung der Bindungskräfte bereitzustellen.

Für die Pelletierversuche sind 5 handelsübliche Stärken unterschiedlicher Dosierung sowie zwei verschiedene Konditionierungsmaßnahmen (mit Wasser und mit Dampf) zum Einsatz gekommen. Durch die kontinuierliche Überwachung ausgewählter technischer Prozessparameter während der Brennstoffproduktion lässt sich tendenziell abschätzen, ob die PHM-Zugabe und / oder die Konditionierungsmaßnahme die Pelletierbarkeit des Materials verändern und ob Auswirkungen auf die Brennstofffestigkeit erkennbar sind. Folgende Ergebnisse lassen sich aus der Untersuchung der 31 Brennstoffchargen zusammenfassen:

- Jedes PHM neigt – je nach Stärkeart, -konzentration und -dosis – zu einer spezifischen Bindefähigkeit (Bindekraft) und diese beeinflusst die (mechanische) Brennstofffestigkeit.
- Ein höherer Wassergehalt im Pressgut kann die Gleitfähigkeit des Materials (Fließfähigkeit) während der Pelletierung verbessern, während die Eindüsung von Heißdampf in der Konditionierung vorrangig zur thermischen Aktivierung der Bindemittel dient.
- Obwohl die Konditionierungsmaßnahmen mit Heißdampf nur eine moderate Temperaturerhöhung des Pressguts bewirken (20 bis 25 K), verbessert sich die Bindungsneigung des Spanguts deutlich (Flexibilität der Spanpartikel) und auch die des rohstoffeigenen Lignins (Verflüssigung des Bindemittels ohne Zunahme des Wassergehalts).
- Bei einem ausreichenden Wassergehalt im Spangut bewirkt die Dampfzumischung – je nach eingesetztem PHM – eine verbesserte Quellwirkung der Stärkekörnchen und somit eine Erhöhung der Bindefähigkeit des Pressguts. Dadurch verbessern sich auch die Presseigenschaften des Materials (Schmierfähigkeit) weiter und die Brennstofffestigkeit steigt.
- Die Ergebnisse der Roh-, Brennstoff- und Ascheanalyse der Versuchsbrennstoffe zeigen, dass – abgesehen von der Brennstofffestigkeit – bei einer maximalen PHM-Dosis von 2 % der Einfluss des Stärkezusatzes auf sonstige Brennstoffeigenschaften der Pellets vernachlässigbar ist. Bei den untersuchten Brennstoffchargen sind zwar mehrfach geringe Grenzwertüberschreitungen einzelner Elementargehalte (N-Gehalt) oder brennstoffspezifischer Kenn-

werte (u. a. Aschegehalt) aufgetreten, deren Ursache kann jedoch nahezu vollständig auf die Rohstoffeigenschaften des Spanmaterials zurückgeführt werden.

- Ähnliche Ergebnisse zeigen die Untersuchungen zum Ascheschmelzverhalten. Die Zumischung von PHM hat nur einen geringen Einfluss auf die Aschezusammensetzung und das Ascheschmelzverhalten der Pellets. Auch hier wird die Schwankungsbreite der Spurenelementgehalte deutlich mehr vom Einfluss des Rohmaterials überlagert. Die analytisch und rechnerisch ermittelten charakteristischen Temperaturen des Ascheschmelzverhaltens der Versuchsbrennstoffe liegen im Bereich von 1 160 bis 1 650°C (DT /FT). Damit kann für keine Pelletcharge ein erhöhtes Verschlackungsrisiko festgestellt werden, da die oberen Feuerraumtemperaturen handelsüblicher Pelletkessel von etwa 1 100°C nicht erreicht werden.

Daraus schlussfolgernd ist festzuhalten, dass sich bei der Holzpelletierung durch eine gezielte Auswahl von stärkehaltigen PHM und Konditionierungsmaßnahmen mit Wasser und Dampf die Pelletiereigenschaften des Pressguts verbessern (Schmier- und Gleitfähigkeit) und die Bindefähigkeit des Materials optimiert werden kann, wodurch sich ferner die Brennstofffestigkeit beeinflussen lässt. Weiterhin wird durch die Dampfzugabe die Homogenisierung des Pressguts beschleunigt, womit sich die Verweilzeiten der Pressgutkonditionierung im Reifebunker verkürzen und damit die Effizienz des Produktionsprozesses gesteigert werden kann.

Die Brennstoffeigenschaften von Holzpellets werden neben den Konditionierungsmaßnahmen von einer Vielzahl weiterer Einflussfaktoren bestimmt, die durch natürliche bzw. rohstoffbedingte, technische und managementbedingte Einflussmöglichkeiten gelenkt werden können. Von der Prozesskettenuntersuchung der Holzpelletbereitstellung bis zum Einsatz des Brennstoffs in einer Feuerungsanlage können allein 20 Einflussfaktoren identifiziert werden, die eine direkte oder indirekte Lenkungswirkung auf die Brennstofffestigkeit haben.

So beeinflussen beispielsweise allein 4 Temperaturen während der Brennstoffproduktion die (mechanische) Festigkeit des Endproduktes:

- die Temperatur des Rohmaterials nach der Spantrocknung,
- die Temperatur des Pressguts im Konditionierer,
- das Temperaturniveau während der Pelletierung des Pressguts
- sowie die Temperatur der Pellets am Austritt aus dem Kühler.

Die Bewertung aller Faktoren zeigt, dass aufgrund der Vielfalt an existierenden Möglichkeiten und deren umfangreichen Wirkungsspektren kein Einflussfaktor zur Optimierung der Brennstofffestigkeit herausgestellt werden kann. Eine besonders hohe Bedeutung kommt neben den bereits erläuterten Konditionierungsmaßnahmen dem Prozess der Rohmaterialauswahl und der Rohstoffaufbereitung sowie dem Einfluss der beteiligten Akteure während der Holzpelletbereitstellung bis hin zum Einsatz des Brennstoffs zur energetischen Nutzung zu.

7.2 Weiterführende Forschungsaktivitäten

Trotz des zunehmenden Bewusstseins der Branche ein geschlossenes Brennstoffqualitätssicherungssystem bis zum Endverbraucher zu gewährleisten (Kapitel 6.2.7), zeigen aktuelle Umfragen (Abb. 1-3), dass für die praktische Umsetzung weiterer Forschungs-, Optimierungs- und Qualifizierungsbedarf in der Pelletbranche notwendig ist. Diese Aktivitäten sollten sich zum einen auf die Brennstoffproduktion und -bereitstellung und zum anderen auf die Einsatzmöglichkeiten von Pellets zur energetischen Nutzung beziehen. Weiterhin sollte die Verfügbarkeit von verifizierbaren Messergebnissen normierter Prüfverfahren erhöht werden. Zusätzlich bestehen offene Fragen bei der Brennstofflagerung einschließlich der Lagersicherheit, der Notwendigkeit die Emissionen aus der Verbrennung von Pelletfeuerungsanlagen weiter zu reduzieren und der branchenübergreifenden Aufgabe, ein lückenloses Zertifizierungssystem für den Nachweis einer nachhaltigen Brennstoffbereitstellung mit biogenen Festbrennstoffen und deren Nutzung zu etablieren. Folgende Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkte für die Optimierung des Holzpel-

letproduktionsprozesses konnten während der Bearbeitung des Themas als relevant identifiziert werden:

- Charakterisierung regionaler und alterungsbedingter Schwankungsbreiten der Rohstoffzusammensetzung
- Bereitstellung von effektiven Rohstoffaufbereitungsverfahren zur Abscheidung, Zerkleinerung und Trocknung inhomogener Rohstoffsortimente (z. B. Waldrestholz) sowie automatisierte und effiziente Entrindungsmöglichkeiten für geringe Stammdurchmesser
- Weiterführende Untersuchungen zur Beimischung von Additiven zur Optimierung der physikalisch-mechanischen Brennstoffeigenschaften (z. B. Festigkeit) sowie zur Kompensation ungünstiger chemisch-stofflicher Brennstoffeigenschaften (wie Reduzierung von Partikelemissionen oder zur Verbesserung des Ascheschmelzverhaltens)
- Flexibilisierung der Möglichkeiten zur Zumischung von ((zäh-)flüssigen) Additiven; Optimierung der Konditionierungsmaßnahmen hinsichtlich des Zeit- und Energieaufwandes
- Verfahrenstechnische Weiterentwicklung des Pressverfahrens unter Berücksichtigung möglichst flexibler rohstoffspezifischer Adaptierungen (Reduzierung des Energieeinsatzes, Minimierung der Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten an der Presse)
- Reduzierung der Pelletbeanspruchung während des Transports, des Umschlags und der Lagerung; Untersuchungen zur mechanischen Dauerfestigkeit, z. B. mittels Coating; Transparente Aufklärung von Risiken während der Pelletlagerung und des Transports
- Weiterentwicklung international gültiger Produktnormen und Qualitätssicherungsmaßnahmen für Holzpellets, entsprechend ihres Einsatzmarktes (Feuerungstechnologie, Leistungsklasse) sowie entsprechender Messverfahren und Prüfmethode zur brennstoffspezifischen Analyse, Validierung von Forschungsergebnissen in der Praxis
- Integration eines Systems zur transparenten Rückverfolgung der Rohstoffherkunft zur Holzpelletbereitstellung, wobei auf etablierte Nachhaltigkeitssysteme aus der Forstwirtschaft und bestehende Qualitätssicherungsmaßnahmen zurückgegriffen werden kann

Für den mittel- und langfristigen Ausbau des Pelletmarktes sind neben stabilen Rahmenbedingungen auch die Mobilisierung zusätzlicher Rohstoffpotenziale (u. a. Waldrestholz, Energiepflanzen) zur Absicherung der prognostizierten Produktionsmengen dringend notwendig. Einen Beitrag dazu könnte die Erweiterung des land- und forstwirtschaftlichen Biomasseangebots durch standortoptimierte Produktionsmethoden und effizientere Bereitstellungskonzepte leisten.

LITERATURVERZEICHNIS

- /1/ AEBIOM: A Pellet Road Map for Europe. European Biomass Association, November 2008
- /2/ Aeckersberg, R.; Schlaug, W.; Witt, J. et al.: Optimierung der Pelletproduktion. Endbericht des FNR-Forschungsvorhabens (FKZ: 22006104, Laufzeit: 08/2005 – 01/2008), durchgeführt von RWTH Aachen, Institut für Energetik und Umwelt (IE), MANN Engineering, April 2008
- /3/ Aeckersberg, R.; Wirtgen, C.; Witt, J. et al.: Optimierung der Pelletproduktion. 3. Zwischenbericht des FNR-Forschungsvorhabens (FKZ: 22006104, 08/2005 – 01/2008), durchgeführt von RWTH Aachen, Institut für Energetik und Umwelt (IE), MANN Engineering, Juni 2007
- /4/ AFNOR: Marque FN 434 – Granulés biocombustibles. FCBA Institut Technologique, AFNOR Certification, Project Référentiel NF Granulés biocombustibles, 2008
- /5/ AIEL: Pellet Gold – Calore Sicuro. AIEL Associazione Italiana Energie Agriforestali, 2006
- /6/ Alakangas, E.: New European Pellet Standards. EUBIONET 3, European Pellet Conference, Wels (AT), 3. – 4. März 2010
- /7/ AltholzV: Verordnung über Anforderungen an die Verwertung und Beseitigung von Altholz (Altholzverordnung – AltholzV) vom 15. August 2002. BGBl. 2002, Teil I, S. 3302
- /8/ BAFA: Geförderter Anlagenbestand an an Pelletanlagen (Primäröfen und Heizungskessel) des Markteinführungsprogrammes (MAP) zwischen 1999 bis 2010, Stand Januar 2012
- /9/ Behnke, A.: Die Ökodesignrichtlinie: Umsetzung für Kleinfeuerungsanlagen mit festen Brennstoffen. Umweltbundesamt, 9. Industrieforum Pellets, Tagungsband, S. 48 – 54, Stuttgart, Oktober 2009
- /10/ Behr, M.: Einflussfaktoren auf das Ascheschmelzverhalten bei der Verbrennung von Holzpellets. 7. Industrieforum Pellets, Tagungsband, S. 153 – 159, Stuttgart, Oktober 2007
- /11/ Behr, M.; Witt, J.; Bosch, J.: Umsetzung der europäischen Norm für Holzpellets in Deutschland. 9. Industrieforum Pellets, Tagungsband, S. 32 – 37, Oktober 2009
- /12/ Berner, J.: Feinstaub raus – Der Feinstaubausstoß von Pelletanlagen lässt sich auf mehrere Arten weiter senken. Pellets Markt und Trend, 01-10, S. 36 – 39, 2010
- /13/ Berner, J.: Warme Luft am laufenden Band. Pellets Markt und Trend, Ausgabe 03/09, S. 16 – 18, Juni 2009
- /14/ Berner, J.: Pelletswerk am Stück. Pellets Markt und Trend, Ausgabe 04/09, S. 26 – 28, August 2009
- /15/ Biedermann, F.; Obernberger, I.: Ash related Problems during Biomass combustion and Possibilities for a Sustainable Ash Utilisation. Austrian Bioenergy GmbH and BIOS Bioenergiesysteme GmbH, Österreich, ohne Datum
- /16/ BImSchG: Bundes-Immissionsschutzgesetz. in der Fassung der Bekanntmachung vom 26. September 2002 (BGBl. I S. 3830), zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 01. November 2005 (BGBl. I S. 1865)
- /17/ BImSchG: Bundes-Immissionsschutzgesetz. in der Fassung der Bekanntmachung vom 26. September 2002 (BGBl. I S. 3830), zuletzt geändert durch Artikel 8 des Gesetzes vom 08. November 2011 (BGBl. I S. 2178)

- /18/ BImSchV: Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Artikel 1 der Verordnung zur Neufassung der Ersten und Änderung der Vierten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes) – Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen –. Bundesgesetzblatt, 14. August 2003
- /19/ BImSchV: Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen – 1. BImSchV). vom 26. Januar 2010, BGBl. 2010, Teil I, Nr. 4, Bonn, 1. Februar 2010
- /20/ Biokraft-NachV: Verordnung über Anforderungen an eine nachhaltige Herstellung von Biokraftstoffen (Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung – Biokraft-NachV). Vom 30.09.2009, BGBl. 2009, Teil I, S. 3182, Oktober 2009
- /21/ BioSt-NachV: Verordnung über Anforderungen an eine nachhaltige Herstellung von flüssiger Biomasse zur Stromerzeugung (Biomassestrom- Nachhaltigkeitsverordnung – BioSt-NachV), vom 23.07.2009, BGBl. 2009, Teil I , Nr. 46, Bonn, S. 2147, 29. Juli 2009
- /22/ Biotech: Austragesysteme für Pelletheizungen. <http://www.pelletsworld.com>, letzter Zugriff 20. Oktober 2010
- /23/ Blomqvist, P.; Persson, H.: Self-heating in storages of wood pellets. SP Technical Research Institute of Sweden, World Bioenergy Conference, Mai 2008
- /24/ BMLFUW: Richtlinie UZ 38 – Brennstoffe aus Biomasse. Österreichisches Umweltzeichen des Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (Lebensministerium), Abteilung VI/5, Wien (AUS), Januar 2009
- /25/ Böhm, Th.: Verfahren zur Bestimmung physikalischer Qualitätsmerkmale und des Wassergehaltes biogener Festbrennstoffe. Dissertation, TU München, Department für Biogene Rohstoffe und Technologie der Landnutzung, Juni 2006
- /26/ Brusckke-Reimer, A.: Eine unendliche Geschichte geht weiter. Pellets Markt und Trend, 01-10, S. 34 – 36, 2010
- /27/ CEN/TR 15569: Solid biofuels - A guide for a quality assurance system. Technical Report, Final Draft, September 2006
- /28/ Chow, S. J.; Pickles, K. J.: Thermal Softening and Degradation of Wood and Bark. Wood and Fibre, No 3 (3), S. 166 – 178, 1971
- /29/ Chow, S.: Thermo-directional movement of wood and wood composites. Wood Science and Technology, No 28, Springer-Verlag, S. 189 – 198, 1994
- /30/ Dahl, J.: Large scale utilization of biopellet applications. 18th European Biomass Conference and Exhibition, Lyon (FR), 3. – 7. Mai 2010
- /31/ DeGEval (Hrsg.): Standards für Evaluation. 4. unveränderte Auflage der Gesellschaft für Evaluation e.V., Mainz, 2008
- /32/ DEPI: Gesamtbestand an Pelletheizungen in Deutschland. Datenquelle BAFA und BDH, www.depi.de, letzter Zugriff 10. Juni 2011
- /33/ DEPI: Wirkungsgrad verschiedener Feuerungsanlagen. Datenquelle ISB Stromberg. www.depi.de, letzter Zugriff 07. April 2010
- /34/ DEPI (Hrsg.): European Pellet Council – Handbuch für die Zertifizierung von Holzpellets für Heizungszwecke nach Norm EN 14961-2. Stand April 2011
- /35/ DEPV: Empfehlungen zur Lagerung von Holzpellets. Informationsblatt 01-2005-A, Deutscher Energie-Pelletverband e.V, Stand 2008/2009
- /36/ DEPV: Pelletproduktion und Inlandsbedarf in Deutschland. Datenquelle Dertsches Energieholz- und Pelletverband, www.depv.de, letzter Zugriff 01. August 2011

- /37/ DGQ: Managementsysteme-Begriffe – Ihr Weg zu klarer Kommunikation. Deutsche Gesellschaft für Qualität (DGQ), Band 11/04, Beuth-Verlag, 7. Auflage, Berlin, 2002
- /38/ Diefenbach, N.; Born, R.; Stärz, N.: Solarthermie / Abluft-Wärmepumpe / Pelletofen: Kombisysteme zur nachhaltigen Wärmeversorgung von Niedrigenergiehäusern im Gebäudebestand. Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU), Darmstadt, 13. November 2009 (ISBN: 978-3-941140-11-0)
- /39/ DIN EN 14961-1: Feste Biobrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen; Deutsche Fassung EN 14961-1:2010. Ersatz für DIN/CEN 14061:2005-05 und teilweiser Ersatz für DIN 51731_1996-10, Normungsausschuss Materialprüfung (NMP) im DIN, April 2010
- /40/ DIN*geprüft*: Zertifizierungsprogramm „Industriell gefertigte Pelletlagerung beim Endkunden“ nach ÖNORM M 7137 unter Berücksichtigung DIN 51731 und ÖNORM M 7135. DIN CERTCO Gesellschaft für Konformitätsbewertung mbH, Stand Oktober 2008
- /41/ DIN Geprüfter Fachbetrieb: Zertifizierungsprogramm „Presslinge aus naturbelassenem Holz – Holzpellets – Qualitätssicherung in der Transport- und Lagerlogistik“ nach ÖNORM M 7136 unter Berücksichtigung DIN 51731 und ÖNORM M 7135. DIN CERTCO Gesellschaft für Konformitätsbewertung mbH, Stand Dezember 2003
- /42/ DIN*plus*: Zertifizierungsprogramm Holzpellets zur Verwendung in Kleinf Feuerungsstätten nach DIN 51731 – HP 5 (ÖNORM M 7135 – HP1). DIN CERTCO Gesellschaft für Konformitätsbewertung mbH, Stand August 2007
- /43/ DIN*plus*: Anforderungsprofil Holzpellets. Checkliste zum Rundschreiben, 14.01.2010
- /44/ DIN 51731: Prüfung fester Brennstoffe – Preßlinge aus naturbelassenem Holz – Anforderungen und Prüfung. Deutsches Institut für Normung e. V., Oktober 1996
- /45/ Doering, S.: Pellets als Energieträger – Technologie und Anwendung. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 2011 (ISBN 978-3-642-01623-3)
- /46/ DüMV: Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung – DüMV). BGBl. I S. 2524, 16. Dezember 2008
- /47/ DüngG: Düngegesetz. Ausfertigungsdatum 09.01.2009, BGBl. I S. 54 (136), zuletzt geändert durch Art. 2 G v. 31.7.2009 I 2539, 31. Juli 2009
- /48/ EC: Report from the Commission to the Council and the European Parliament on sustainability requirements for the use of solid and gaseous biomass sources in electricity, heating and cooling. SEC(2010) 65, SEC(2010) 66, 25. Februar 2010
- /49/ Ecolabelling: Swan-labelling of Biofuel pellets. version 2.0, Nordic Ecolabelling (Denmark, Norway, Iceland, Finland, Sweden), Stand 13. Dezember 2007
- /50/ Endres, H. J.: Papierproduktion. Skripte der Vorlesungsreihe „Stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe“ FH Hannover, Fakultät Maschinenbau und Bioverfahrenstechnik. unveröffentlicht, Hannover, 2006
- /51/ Engels, V.: Gut gelagert. Wohnen und Energie – Marktübersicht Pelletlager in: Haus + Energie, S. 46 – 67, März/April 2008
- /52/ Englisch, M., Koskarti, P.: Europäische Normen – Qualitäts- und Zertifizierungssysteme für Pellets in Europa. 8. Industrieforum Pellets, Tagungsband, S. 102 – 109, Oktober 2008
- /53/ Englisch, M.: Einheit für Europa – Vorschau auf den Entwurf der europäischen Pelletnorm EN14961-Teil 2. pellets Markt & Trends 02-09, S. 18 – 20, 2009

- /54/ Englisch, M: Zertifizierungssysteme für Holzpellets – ÖNORM, DIN, Pellet Gold, ITE-BE. ofi-Workshop „Biomasse-Normung“, Österreichisches Forschungsinstitut für Chemie und Technik, Wien, Juni 2009
- /55/ Erler, U.: persönliche Aussage zur Thematik „Schlackebildung in Pelletfeuerungen“ im Rahmen des 7. Industrieforum Pellets nach Auswertungen der Analyseergebnisse von DBI AUA (eurofins), Stuttgart, Oktober 2007
- /56/ Ertmer, K.: Die richtige Hardware. Sonne Wind & Wärme, Nr. 6, S. 112 – 115, 2010
- /57/ Evald, A.; Witt, J.: Biomass CHP best Practice Guide. Final Results of the Altener Project “Bio-CHP – European Biomass CHP in practice”(contract no 4.1030/Z/02-150/2002), März 2006
- /58/ EUWID: Pelletproduktion in der EU stieg 2010 um rund 13 %. EUWID Holz und Holzwerkstoffe, Nr. 40, S. 10, Oktober 2011
- /59/ EUWID: Weiteres Wachstum der Pelletmärkte stark von langfristigen Förderanreizen abhängig. EUWID Holz und Holzwerkstoffe, Nr. 40, S. 11, Oktober 2011
- /60/ Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e. V. (Hrsg.): Leitfaden Bioenergie - Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen. gefördert durch das Bundesministeriums für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL), aktualisierte Fassung, 2005
- /61/ Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e. V. (Hrsg.): Marktübersicht Scheitholzvergaserkessel Scheitholz-Pellet-Kombinationskessel. gefördert durch das Bundesministeriums für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL), 5. Auflage, Gülzow, Februar 2007
- /62/ Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e. V. (Hrsg.): Marktübersicht Pellet-Zentralheizungen und Pelletöfen. gefördert durch das Bundesministeriums für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL), 4. Auflage, Gülzow, Februar 2007
- /63/ Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e. V. (Hrsg.): Marktübersicht Pellet-Zentralheizungen und Pelletöfen. gefördert durch das Bundesministeriums für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL), 6. Auflage, Gülzow, Februar 2010
- /64/ Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e. V. : Anbau nachwachsender Rohstoffe in Deutschland. <http://www.nachwachsenderohstoffe.de>, letzter Zugriff Dezember 2011
- /65/ FSC: <http://www.fsc-info.org>, letzter Zugriff Dezember 2009
- /66/ Friedl, G.; Wopienka, E.; Haslinger, W.: Schlackebildung in Pelletfeuerungen. 7. Industrieforum Pellets, Tagungsband, S. 147 – 152, Stuttgart, Oktober 2007
- /67/ Fruhwirth, R.: Nassvermahlung von Hackschnitzel. 7. Industrieforum Pellets, Tagungsband, S. 126 – 128, Stuttgart, Oktober 2007
- /68/ Gaderer, M.; Kunde, R., Spliethoff, H.: Systemuntersuchung an Heizungsanlagen. Brennstoff-Wärme-Kraft (BWK), Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG, Sonderdruck aus Nr. 12 (2007), S. 1 – 8, Düsseldorf, 2007
- /69/ Gilpin, A. S.; Hermann, T. J. et al.: Feed moisture, retention time, and steam as quality and energy utilization determinants in the pelleting process. In: Agriculture, Applied Engineering, issue 18, No. 3, S. 331 – 338, 2002
- /70/ Granström, K.: Emissions of hexanal and terpenes during storage of wood sawdust and pellets. Karlstad University, Department of Energy, Environmental and Building Technology, International Bioenergy Conference, Jyväskylä (FIN), 31. August – 3. September 2009
- /71/ Greinöcker, C.; Pichler, W.; Golser, M.: Hygroscopicity of wood pellets – Test method development, Influence on pellets, Coating of wood pellets. Holzforschung Austria

- (HFA), Proceedings of the 2nd World Conference on Pellets, Jönköping (SE), 30. May – 01. Juni 2006
- /72/ Gruber, E.: Grundlagen der Zellstofftechnologie. Vorlesungsskripte der Berufsakademie Karlsruhe, <http://gruberscript.net>. Zugriff am 24. Juli 2009
- /73/ Haller, M. Y.: Combined solar and pellet heating systems – Improvement of energy efficiency by advanced heat storage techniques, hydraulics, and control. Dissertation, Graz University of Technology, Institute of Thermal Engineering, Mai 2010
- /74/ Haller, M. Y.; Haberl, R. et al.: Effizienzsteigerung und Emissionsminderung von Pellet-Solar Heizungen. 10. Industrieforum Pellets, Tagungsband, Stuttgart, September 2010
- /75/ Härdtlein, M.; Eltrop, L.; Thraen, D. (Hrsg.): Voraussetzungen zur Standardisierung bio-gener Festbrennstoffe, Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“, Band 23, Landwirtschaftsverlag Münster, 2004
- /76/ Hanskötter, B.: Holzverwendung / Holzmarkt. Vorlesungsskripte „Forstnutzung“, FH Göttingen, Fakultät Ressourcenmanagement. unveröffentlicht. Göttingen, 2005
- /77/ Hartmann, H.; FNR (Hrsg.): Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen. Publikation der Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e. V (FNR) mit Unterstützung des Bundesministeriums für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL), 2. Auflage, 2007 (ISBN 3-00-011041-0)
- /78/ Hartmann, H.; Rossmann, P. et al.: Staubemissionen aus Holzfeuerungsanlagen – Einflussfaktoren und Bestimmungsmethoden. Berichte aus dem TFZ 10, im Auftrag des UBA und in Kooperation mit dem IVD Universität Stuttgart, Straubing, Juli 2006
- /79/ Hartmann, H.; Schmid, V.; Link, H.: Untersuchungen zum Feinstaubausstoß von Holz-zentralheizungen kleiner Leistung – Partikelgrößenverteilung, Gesamtstaub und weitere Kenngrößen. Berichte aus dem TFZ, Nr. 4, im Auftrag des UBA und in Kooperation mit dem IVD Universität Stuttgart, Straubing, 2003
- /80/ Hartmann, H.: Physical-Mechanical Fuel Properties – Significance and impacts. in: Hein, M; Kaltschmitt, M (eds): "Standardisation of Solid Biofuels" – International Conference, Institute for Energy and Environment (IE), S. 106-115, Leipzig, 6. – 7. Oktober 2004
- /81/ Hasler, P.; Nussbaumer, T. et al.: Herstellung von Pellets. Schlussbericht Verenum, Zürich im Auftrag vom: Bundesamt für Energie und Bundesamt für Umwelt, Wald und Landwirtschaft, Dezember 2001
- /82/ Haslinger, W.: Biomassekleinfeuerungsanlagen – Überblick und Darstellung innovativer Entwicklungen. 8. Industrieforum Pellets, Tagungsband, S. 53 – 58, Oktober 2008
- /83/ Haslinger, W.; Schwarz, M. et al.: Nutzungsgradanalyse von Pelletfeuerungen. 10. Industrieforum Pellets, Tagungsband, Stuttgart, September 2010
- /84/ Haslinger, W.; Schmidl, C.: Challenges and requirements for the technical development of pellet testing systems. 10. Industrieforum Pellets, Tagungsband, Stuttgart, September 2010
- /85/ Havimo, M.; Rikala, J.: The effect of process conditions on pellet properties in laboratory scale. Department of Forest Science University of Helsinki (FIN), 19th European Biomass Conference, Berlin, 06. – 10. Juni 2011
- /86/ Heinz, A., Haller, M. et al.: Pellsol Plus – Effizienzsteigerung von Pellets-Solar-Systemen für Raumheizung und Warmwasser durch Optimierung der Hydraulik, Regel-technik und Wärmespeicherung. Endbericht, Projekt im Rahmen des Programms Energie der Zukunft, Klima- und Energiefonds Österreich (BMVIT), 2010
- /87/ Heinze, G.: Handbuch der Agglomerationstechnik. Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim, 2000 (ISBN 3-527-29788)

- /88/ Hellwig, M.: Zum Abbrand von Holzbrennstoffen unter besonderer Berücksichtigung der zeitlichen Abläufe. Dissertation, Techn. Universität München, Institut für Landtechnik, August 1988
- /89/ Herzog, P.; Golser, M.: Forschung zur Verbesserung der Pelletqualität. European Pellet Conference, Tagungsband, S. 297 – 316, Wels (AT), 2004
- /90/ Hiegl, W.; Jansson, R.; Pichler, W.: Advancement of pellets-related European standards. Del. 7.5 of the EU-project “pelletatlas” (EIE/06/020/SI2.448557), Intelligent Energy Europe Programme, Oktober 2009
- /91/ Hiendlmaier, S.: Der Brennstoff Strohpellets. Infoschreiben Strohpellets, C.A.R.M.E.N e.V., Dezember 2006
- /92/ Hilgers, C.: Pelletslager für alle Fälle. Sonne Wind & Wärme 3/2009, S. 60 – 67, März 2009
- /93/ Hilgers, C.: Kühle für Koller. Pellets Markt und Trend, 01/11, S. 44 – 45, Juni 2010
- /94/ Hilgers, C.: Grüner Fußabdruck für Holzpellets. Pellets Markt und Trend, 06/10, S. 12-13, Dezember 2010
- /95/ Hogeckamp, S.: Über eine modifizierte Strahlagglomerationsanlage zur Herstellung schnell disperierbarer Pulver. Universität Karlsruhe, Fakultät Chemieingenieurwesen, Juli 1997
- /96/ Holm, J. K.; Henriksen, U. B.; Hustad, J. E.; Sorensen, L. H.: Toward an understanding of controlling parameters in softwood and hardwood pellets production. Energy Fuels, 20, 2006, Nr. 6, S. 2686 – 2694
- /97/ Holzabsatzfonds (Hrsg.): Moderne Holzfeuerungsanlagen. 2. überarbeitete Auflage, Bonn, 2001
- /98/ Holzabsatzfonds (Hrsg.): Waldblick – Einblicke in die nachhaltige Forstwirtschaft, Absatzförderungsfonds der deutschen Forst- und Holzwirtschaft, Bonn, November 2007
- /99/ Huttunen, S.; Laine, K.; Torvela, H.: Seasonal sulphur contents of pine needles as indices of air pollution. Annales Botanici Fennici, No 22 (4), S. 343 – 359, 1985
- /100/ IWR: Pelletmarkt 2011 -Deutschland-Absatz lahm. Pressemitteilung Internationales Wirtschaftsforum Regenerative Energien, 01. Februar 2012
- /101/ Kaltschmitt, M.; Bosch, J.; Witt, J.: Solid biofuels – Do standards support the development? International Congress „Biomass & role of standards: Standardised biomass, a mature market?, Delft (NL), 11. – 15. Oktober 2010
- /102/ Kaltschmitt, M.; Hartmann, H. (Hrsg.): Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren. 1. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2000
- /103/ Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.; Hofbauer, H. (Hrsg.): Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren. 2. neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2009 (ISBN 978-3-540-85094-6)
- /104/ Kaltschmitt, M.; Mohrig, V.; Witt, J. et al.: Critical Control Points. deliverable III.6, task leader Ofi-Austrian Research Institute for Chemistry and Technology, BioNorm II, EU-Project (FP6, no. 038644), European Commission, Februar 2008
- /105/ Kaltschmitt, M.; Mohrig, V.; Witt, J. et al.: Assessment and Evaluation of Data. deliverable III.7, task leader Ofi-Austrian Research Institute for Chemistry and Technology, BioNorm II, EU-Project (FP6, no. 038644), European Commission, Oktober 2008
- /106/ Kaltschmitt, M.; Mohrig, V.; Witt, J. et al.: Guideline – Procedure for Quality Planning. deliverable III.8, task leader Ofi-Austrian Research Institute for Chemistry and Technology, BioNorm II, FP6-Project (no. 038644), European Commission, Mai 2009

- /107/ Kaltschmitt, M.; Mohrig, V.; Witt, J. et al.: Assessment and Evaluation of Data. deliverable III.9, task leader Sparkling Projects b.v., BioNorm II, FP6-Project (no. 038644), European Commission, Mai 2009
- /108/ Kaltschmitt, M.; Mohrig, V.; Witt, J. et al.: Procedure for Quality Improvement. deliverable III.10, task leader DBFZ German Biomass Research Centre, BioNorm II, FP6-Project (no. 038644), European Commission, Juni 2009
- /109/ Kaltschmitt, M.; Wiese, A.; Streicher, W. (Hrsg.): Erneuerbare Energien – Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2003
- /110/ Kaltschmitt, M.; Witt, J.: Thermische Biomassenutzung in der EU25 – Märkte und deren Entwicklung. Fachtagung „Strom und Wärme aus biogenen Festbrennstoffen“, VDI Wissensforum GmbH, VDI-Bericht 2044, S. 9 – 20, Salzburg, 15. und 16. Oktober 2008
- /111/ Kaltschmitt, M.; Witt, J.; Wirkner, R. BioNorm II - Pre-normative research on solid biofuels for improved European standards. Final Project Conference, Leipzig, 04. November 2009
- /112/ Kharazipour, A.: Enzyme von Weißfäulepilze als Grundlage für die Herstellung von Bindemitteln für Holzwerkstoffe. Band 121, J.D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt am Main, 1996
- /113/ Kiesewalter, S.; Röhrich, C.: Pelletierung von Stroh und Heu. European Pellets Conference 2004, Tagungsband S. 283-296, Wels (AUS), Februar 2004
- /114/ Kirsten, C.; Weller, N.; Pilz, B.: Miscanthuspellets: Chancen, Erfahrungen und Probleme in Deutschland. Europäische Pelletkonferenz, World Sustainable Energy Days 2010, Wels (AT), 03. März 2010
- /115/ Klausmann, W.: Entwicklung einer neuen Low-Dust Biomasse – Feuerungstechnologie im Nennleistungsbereich von 10 bis 25 kW für den Brennstoff Weichholzpellets. Viessmann Werke GmbH & Co.KG, Projekttag Bioenergie 2050 „Auf dem Weg zur Umsetzung des Energiekonzepts der Bundesregierung“ des BMELV / FNR / DBFZ, Berlin, 07. Juli 2011
- /116/ Klenkhart, R.: Chemie des Holzes. Kapitel 4 – Chemie des Holzes. wko-Portal der Wirtschaftskammer Österreich, 13. Januar 2005
- /117/ Koch, E. R.; Behnke, K. C. et al.: The effect of steam conditioning rate on the pelleting process. Animal Feed Science and Technology, No. 6, S. 83 – 90, 1981
- /118/ Kölling, C.; Stetter, U.: Holzasche – Abfall oder Rohstoff, Wege zu einer sinnvollen Verwertung. In: LWG aktuell 63/2008 S. 54-56, Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (Hrsg.), Freising, 2008
- /119/ Koop, D.: Filigranarbeit – Über die Kunst des Pelletpressenbaus. Pellets Markt und Trend, 06-09, S. 28 – 31, 2009
- /120/ Kopp, D.: Kleckern statt Klotzen. Erneuerbare Energien, S. 94 – 101, März 2011
- /121/ Kratzer, M.: Leistungs- und Qualitätssteigerungen durch Prozessoptimierung. Bühler AG, 7. Industrieforum Pellets, Tagungsband, S. 123 – 125, Oktober 2007
- /122/ KrW-/AbfG: Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz - KrW-/AbfG). BGBl. I S. 2705, 27. September 1994, zuletzt geändert durch Artikel 5 der Verordnung, BGBl. I S. 2986, 22. Dezember 2008
- /123/ Kunde, R.: Emissions- und Leistungsmessungen an Pelletkesseln im Bestand. 8. Industrieforum Pellets, Tagungsband, S. 15 – 33, Oktober 2008

- /124/ Kunde, R., Volz, F.; Gaderer, M.: Felduntersuchungen an Holzpellet-Zentralheizkesseln. Brennstoff-Wärme-Kraft (BWK), Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG, Sonderdruck aus Nr. 1/2 (2009), S. 1 – 8, Düsseldorf, 2009
- /125/ Kuschel, M.: Veredelung von Holzhackschnitzeln durch Aufschluss, Modifizierung und Pressverdichtung. Dissertation, Technische Universität Bergakademie Freiberg, 2004
- /126/ Langer, Riebelung, Tennagels: Holzfeuerungen in NRW – 1. Teil: Evaluierung des Pelletmarktes in NRW für die Jahre 1998 – 2003. Referat II-1, Energetische Nutzung, Bonn, 16. November 2004
- /127/ Langheinrich, C.: Qualitätsmanagementsystem für biogene Festbrennstoffe – Entwicklung und Verifikation –. Dissertation an der Technischen Universität Hamburg-Harburg, 2007
- /128/ Lasselsberger, L.: Biogene Brennstoffe. Tagung „Landtechnik im Alpenraum 2008“, HBLFA – Francisco Josephinum, BTL – Biomass-Logistica-Technology, FJ-BLT Wieselburg, 2008
- /129/ Lehmann, B.: Optimierung der Pelletproduktion – Untersuchungen zu Brennstoffqualität und Feuerraumdesign. Diplomarbeit der Fachhochschule für Technik und Wirtschaft Berlin in Zusammenarbeit mit dem Institut für Energetik und Umwelt gGmbH, Leipzig, August 2007
- /130/ Lenz, V.; Thraen, D. et al.: Bewertung und Minderung von Feinstaubemissionen aus häuslichen Holzfeuerungsanlagen. Deutsches BiomasseForschungsZentrum (DBFZ) in Kooperation mit TUHH und TFZ, DBFZ Report Nr. 1, Leipzig, 2010 (ISSN: 2190-7943)
- /131/ Lethigangas, P.: Storage effects on pelletised sawdust, logging residues and bark. Biomass and Bioenergy, 19, S. 287 – 293, 2000
- /132/ Lethigangas, P.: Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark. Biomass and Bioenergy, 20, S. 351 – 360, 2001
- /133/ LfU (Hrsg.): Merkblatt – Verwertung und Beseitigung von Holzaschen. Bayerisches Landesamt für Landwirtschaft (LfL) und Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), 2009
- /134/ Maciejewska, A.; Veringa, H. et al.: Co-firing of biomass with coal: Constraints and role of biomass pre-treatment. DG JRC Institute for Energy (European Commission Joint Research Centre), EUR 22461 EN, 2006
- /135/ Liese, J. (Hrsg.): Handbuch der Holzkonservierung. 3. Auflage, Springer-Verlag OHG, Berlin-Göttingen-Heidelberg, 1950
- /136/ Mediavilla, I., Esteban, I. S., Carrasco, J. E.: Optimisation of pine sawdust pelletisation conditions. 18th European Biomass Conference and Exhibition, Lyon (FR), 3. – 7. Mai 2010
- /137/ Mall: Pelletspeicher mit Maulwurf 2500 für die unterirdische Lagerung von Pellets. <http://www.mall.info>, letzter Zugriff 20. Oktober 2010
- /138/ Mani, S.; Tabil, L. G. et al.: Evaluation of compacting equations applied to four biomass species. Canadian Biosystems Engineering, No 46, S. 355 – 61, 2004
- /139/ Mann, M.: Vom Nebenprodukt zum „Energiewürmchen“. Erneuerbare Energien, 11/2005, S. 68-69, November 2005
- /140/ Meier, D.: Die Kunst des Pelletierens – Erfahrungen aus 25 Jahren Holzpelletiertechnik. 8. IndustrieForum Pellets, Tagungsband, S. 110 – 113, Stuttgart, Oktober 2008
- /141/ Möbius, U.: Ein Beitrag zur Optimierung der Pelletproduktion. Diplomarbeit der Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig (HTWK), Fachbereich Maschinen-

- und Energietechnik in Zusammenarbeit mit dem Institut für Energetik und Umwelt gGmbH (IE), April 2006
- /142/ Mohrig, V.; Witt, J.: Internationaler Biomassehandel erfordert Standards. Holz-Zentralblatt, Nr. 40, DRW-Verlag Weinbrenner GmbH & Co KG, S. 1109, 02. Oktober 2008 (ISSN 0018-3792)
- /143/ Nikolaisen, L.; Jensen, T. N.: Pellet recipes for high quality and competitive prices. European Pellets Conference 2004 - Tagungsband S. 199-208, Wels (AUS), Februar 2004
- /144/ Nikolaisen, L.; Daugbjerg Jensen, P. et al.: Guidelines for storing and handling of solid biofuels. NORDTEST, Nordic Innovation Centre, Oslo (NOR), August 2008
- /145/ Nussbaumer, T.: Teil 1: Grundlagen der Holzverbrennung. Vorlesung Holzenergie, Schweizer Baudokumentation (BHMSV 00550), Blauen (CH), August 2000
- /146/ Nussbaumer, T.: Teil 2b: Holzpellets und Pelletheizungen. Vorlesung Holzenergie, Schweizer Baudokumentation (BHMSV 00550), Blauen (CH), Oktober 2002
- /147/ Nussbaumer, T.: Ruß und Methan relativieren Klimaneutralität von Holz. Holz-Zentralblatt, Nr. 44, DRW-Verlag Weinbrenner GmbH & Co KG, S.1110, 05. November 2010 (ISSN 0018-3792)
- /148/ Obernberger, I.: Stand und Entwicklung der Verbrennungstechnik. Fachtagung „Thermische Biomassenutzung – Technik und Realisierung“, VDI Verlag GmbH, VDI-Bericht 1319, S. 47 – 80, Düsseldorf, 1997 (ISBN 3-18-0913 19-3)
- /149/ Obernberger, I.: Erforderliche Brennstoffeigenschaften holz- und halmgutartiger Biomasse für den Einsatz in Großanlagen (1 bis 20 MW thermische Leistung). Biomasse als Festbrennstoff – Anforderungen – Einflussmöglichkeiten – Normung, Schriftenreihe "Nachwachsende Rohstoffe" Band 6, Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster 1996
- /150/ Obernberger, I.: Aschen aus Biomassefeuerungen – Zusammensetzung und Verwertung. Fachtagung „Thermische Biomassenutzung – Technik und Realisierung“, VDI Verlag GmbH, VDI-Bericht 1319, S. 199 – 222, Düsseldorf, 1997 (ISBN 3-18-0913 19-3)
- /151/ Obernberger, I.; Thek, G.: Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour. Biomass & Bioenergy, No 27, S. 653-669, 2004
- /152/ Obernberger, I.; Thek, G.: Herstellung und Nutzung von Pellets. Schriftenreihe Thermische Biomassenutzung, Band 5, Technische Universität Graz, Institut für Prozesstechnik, Februar 2009 (ISBN 978-3-9501980-5-8)
- /153/ Öhmann, M.; Boman, C. et al.: Slagging tendencies of wood pellet ashes during combustion in residential pellet burners. Biomass & Bioenergy, No 27, S. 585 – 596, 2004
- /154/ Öhmann, M.; Nordin, A. et al.: Reasons for slagging during stemwood pellet combustion and some measures for prevention. Biomass & Bioenergy, No 27, S. 597 – 605, 2004
- /155/ Olsson, O.; Hillring, B. et al.: European wood pellet market integration – A study of the residential sector. Swedish University of Agriculture Science, in: Biomass & Bioenergy, August 2010
- /156/ ÖNORM M 7135: Presslinge aus naturbelassenem Holz oder naturbelassener Rinde – Pellets und Briketts – Anforderungen und Prüfbestimmungen. Österreichischen Normungsinstitut, November 2000
- /157/ ÖNORM M 7136: Presslinge aus naturbelassenem Holz – Holzpellets – Qualitätssicherung in der Transport- und Lagerlogistik. Österreichischen Normungsinstitut, Juni 2002
- /158/ ÖNORM M 7137: Presslinge aus naturbelassenem Holz – Holzpellets – Anforderungen an die Pelletslagerung beim Endkunden. Österreichischen Normungsinstitut, Oktober 2003

- /159/ Ortner, H.: Die Anwendung der Brennwerttechnik bei der Pelletheizung. ÖkoFEN, Oktober 2006
- /160/ o. V.: Vorrichtung und Verfahren für die Steuerung eines Entrindungsverfahrens. Patentschrift der Erfinder SILENIUS, Seppo, SF-15150 Lahti (FI) und SUOMINEN, Ari, SF-15300 Lahti (FI), vertreten durch Zipse & Habersack, 80639 München, EP-Aktenzeichen: 919084533, 18. April 1996
- /161/ o. V.: Kleine Pellets ganz groß - Holzspäne werden zum umweltfreundlichen Heizmittel. GKD – Gebr. Kufferath AG, Düren
- /162/ o. V.: Bandtrockner für Sägespäne, Pellets, Hackschnitzel und anderer. STELA Laxhuber GmbH, Massing, <http://www.stela-drying-technology.de/de/produkte/bandtrockner/>, letzter Aufruf: 30. Juli 2010
- /163/ o. V.: PFI Standard Specification for Residential / Commercial Densified Fuel. Pellet Fuel Institute (PFI), USA, 18. Juni 2008
- /164/ o. V.: PFI Quality Assurance / Quality Control (QA/QC) Program for Residential / Commercial Densified Fuels. Pellet Fuel Institute (PFI), USA, 18. Juni 2008
- /165/ o. V.: Summary of European wood pellet analysis data within CEN/TC 335 WG 2. data file N231 rev. 2 (data from GER, FIN, DK, SE and ITL), 28.02.2010 and N232 (data from AT), 24.02.2010
- /166/ o. V.: Vergleich Heizungssysteme – Pellets klimafreundlicher. Stiftung Warentest, www.test.de, 11. September 2010
- /167/ o. V.: Keine Chance für Schuppen. Pellets – Markt und Trends, 04/10, S. 57, 2010
- /168/ o. V.: Green Pellet Certificate DIN EN ISO 14044 to WWP. Bioenergy International, No 47, 6/10, p. 24, October 2010
- /169/ o. V.: Damit's beim Pellet nicht schlackt und bröselt.... Brennstoffspiegel, S. 34 – 35, Leipzig, Juli 2011
- /170/ Pabst, S.: Branche steht in den Startlöchern. Pellets – Markt und Trends, 05/10, S. 10 – 13, 2010
- /171/ Pabst, S.: Warten auf den Durchbruch. Pellets – Markt und Trends, 06/11, S. 12 – 15, 2011
- /172/ Paradigma: Der Paradigma HolzPellets-Kessel Pelletti - Pelletti II Mini, Pelletti II 103 ... 323. Montage- und Installationsanleitung, Inbetriebnahme für das Fachhandwerk, Paradigma Energie- und Umwelttechnik GmbH & Co. KG, Karlsbad, September 2005
- /173/ Paradigma: Holzpelletsysteme – Pelletti II. Planungshandbuch 2006/2007, Energie- und Umwelttechnik GmbH & Co. KG, Karlsbad, März 2006
- /174/ Paradigma: Holzpellets-Kessel Pelletti. Produktinfo, Energie- und Umwelttechnik GmbH & Co. KG, Karlsbad, Mai 2006
- /175/ Pastusiak, R.: Charakterisierung von Zellstoffkomponenten – Analytik, Spektroskopie, Reaktionskinetik und Modellierung. Dissertation, Technischen Universität München, Fakultät Chemie, München, Juli 2003
- /176/ PEFC: <http://register.pefc.cz>, letzter Zugriff Dezember 2009
- /177/ Persönliche Mitteilung D. Baust, PLANT Engineering gGmbH, Projekttreffen WP III des EU-Projektes BioNorm II, 02. Februar 2009
- /178/ Persönliche Mitteilung W. Schlaug, PLANT Engineering gGmbH, Besichtigung des Pelletwerkes Oberhonnefeld, 03. Februar 2009 und Mailkontakt 28. März 2011
- /179/ Persson, H.; Blomqvist, P.: Silo Fires and Silo Fire Fighting. SP Technical Research Institute of Sweden, International Bioenergy Conference, Jyväskylä (FIN), 31. August – 3. September 2009

- /180/ Pettersson, M.; Nordfjell, T.: Fuel quality changes during seasonal storage of compacted logging residues and young trees. *Biomass & Bioenergy*, No. 31, S. 782 – 792, 2007
- /181/ Pichler, W.; Golser, M.: Neue Optimierungsansätze in der Pelletproduktion. 5. Industrie-forum Pellets, Tagungsband, S. 61, Stuttgart, Oktober 2005
- /182/ Pichler, W.; Greinöcker, C., Golser, M.: Pellet Quality Optimisation – Systematic analysis of influencing factors along the production-process and microwave- and H₂O₂-activation of the raw material. *Holzforschung Austria*, Austrian Forest Research and Accredited Testing Laboratory, Proceedings of the 2nd World Conference on Pellets, Jönköping (SE), 30. May – 01. Juni 2006
- /183/ Pichler, W.: Spezifikationen und Klassen bei Biobrennstoffen – CEN/TS 14961-1, 2, 3, 4. *Holzforschung Austria*, Workshop „Biomasse-Normung“ des Österreichischen Forschungsinstitut für Chemie und Technik (ofi), Wien, Juni 2009
- /184/ Pieper, A.: Untersuchungen zur Schadstoffbildung und Emissionsminderung der energetischen Verwertung von Resthölzern in Kleinfeuerungsanlagen. Dissertation, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, April 2001
- /185/ Pietsch, W.: Agglomeration processes: Phenomena, Technologies, Equipment. Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim, 2002 (ISBN: 9783527303694)
- /186/ Poehler Rotach, E.; Seubert Hunziker, H.: *Holzkunde II – Teil 2 Holzchemie*. Skript der Professur Holzwissenschaften, ETH Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2000, Aktualisierung 2001
- /187/ prEN 14588: Solid biofuels - Terminology, definitions and descriptions. European Committee for Standardisation, CEN/TC 335 / WG 1, 2008
- /188/ prEN 14961-2: Feste Biobrennstoffe - Brennstoffspezifikationen und -klassen - Teil 2: Holzpellets für den nichtindustriellen Gebrauch, European Committee for Standardisation, CEN/TC 335 / WG 2, 2010
- /189/ prEN 14961-6: Feste Brennstoffe - Qualitätssicherung von Brennstoffen – Teil 6: Nicht-holzartige Pellets für den nichtindustriellen Gebrauch. European Committee for Standardisation, CEN/TC 335 / WG 2, 2009
- /190/ prEN 15234-1: Feste Brennstoffe - Qualitätssicherung von Brennstoffen. European Committee for Standardisation, CEN/TC 335 / WG 2, Stand N223: Dezember 2009
- /191/ prEN 15234-2: Feste Brennstoffe - Qualitätssicherung von Brennstoffen – Teil 2: Holzpellets für den nichtindustriellen Gebrauch, TC 335 / WG 2, Stand N254: Juni 2010
- /192/ proPellets: Europäischer Pelletsmarkt: Verdoppelung bis 2015. *Nachwachsende Rohstoffe*, Nr. 60, S. 22, Juni 2011 (ISSN 1993-1476)
- /193/ Rakos, C.: Sichere Pelletlager – eine Aufgabe für unsere Branche. proPellets Austria, Treffen der europäischen Pelletverbände bei den World Sustainable Energy Days, Wels (AT), 05. März 2010
- /194/ RAL (Hrsg.): RAL-UZ 111 – Holzpelletöfen. Vergabegrundlage für Umweltzeichen. RAL Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e. V., Sankt Augustin, 2007
- /195/ RAL (Hrsg.): RAL-UZ 111 – Holzpelletöfen. Vergabegrundlage für Umweltzeichen. RAL Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e. V., Sankt Augustin, 2011
- /196/ RAL (Hrsg.): RAL-ZU 112 – Holzpellettheizkessel. Vergabegrundlage für Umweltzeichen, RAL Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e. V., Sankt Augustin, 2007

- /197/ RAL (Hrsg.): RAL-ZU 112 – Holzpellettheizkessel. Vergabegrundlage für Umweltzeichen, RAL Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e. V., Sankt Augustin, 2011
- /198/ RAL (Hrsg.): RAL-ZU 153 – Technisch getrocknete Holzhackschnitzel / Holzpellets. Vergabegrundlage für Umweltzeichen, RAL Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e. V., Sankt Augustin, Januar 2011
- /199/ Rapp, S.: komprimierte Vorstellung von Untersuchungsergebnissen zur Thematik „Pelletqualität und Schlackebildung in Feuerungsanlagen“, vorgestellt in der DEPV-Arbeitskreissitzung „Pelletqualität und Kesseloptimierung“, Fulda, 19. März 2007 sowie bei German Pellets in Ettenheim am 11. Mai 2007
- /200/ Rensberg, N.; Witt, J.; Thraen, D.: Sustainable biomass resources and outlook on the European pellet market until 2020. 18th European Biomass Conference, Lyon, 03. – 07. Mai 2010
- /201/ Relova, I.; Vignote, S. et al.: Optimisation of the manufacturing variables of sawdust pellets from the bark of *Pinus caribaea* Morelet: Particle size, moisture and pressure. *Biomass & Bioenergy*, No 33, S. 1352 – 1357, 2009
- /202/ Reznichenko, O.: Herstellung von Brennstoffagglomeraten aus Kohlen mit unterschiedlichem Inkohlungsgrad für Kleinf Feuerungsanlagen. Dissertation, Technischen Universität Bergakademie Freiberg, Fakultät für Maschinenbau, Verfahrens- und Energietechnik, 12. Dezember 2003
- /203/ Richtlinie 2005/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 6. Juli 2005 zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energiebetriebener Produkte und zur Änderung der Richtlinie 92/42/EWG des Rates sowie der Richtlinien 96/57/EG und 2000/55/EG des Europäischen Parlaments und des Rates, Amtsblatt der Europäischen Union, 22. Juli 2005
- /204/ Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Oktober 2009 zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte. Amtsblatt Nr. L 285, 31. Oktober 2009
- /205/ Richtlinie 2008/50/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Mai 2008 über Luftqualität und saubere Luft für Europa. Amtsblatt der Europäischen Union, 11. Juni 2008
- /206/ Richtlinie 2009/28/EG des Europäischen Parlaments und Rates vom 23. April 2009 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien 2001/77/EG und 2003/30/EG, Amtsblatt der Europäischen Union, 05. Juni 2009
- /207/ Rinke, G.: Qualität bei Holzpellets ist kein Zufall. *Holzzentralblatt*, Nr. 44, DRW-Verlag Weinbrenner GmbH & Co KG, S. 667, 03. Juni 2003 (ISSN 0018-3792)
- /208/ Rinke, G.: Falsche Technik, teuer bezahlt – Erfahrungen der gutachterlichen Tätigkeit an Pelletproduktionsanlagen. 10. *Industrieforum Pellets*, Tagungsband, Stuttgart, September 2010
- /209/ Rohde H. R.; Nef, E.; Meissner W.: Technologie der Mischfutterherstellung. in: Kersten, J.; Rohde, H. R.; Nef, E.: *Mischfutter Herstellung – Rohware Prozesse Technologie*. Agri-media, 2. Auflage, 2004, S. 157 – 272
- /210/ Rommeiß, N.: Verwendung von Bindemitteln in der Pelletproduktion – Einfluss auf die Qualität und die Verbrennung von Holzpellets. Unveröffentlichte Diplomarbeit der Technischen Universität Berlin, Fakultät III, Prozesswissenschaften in Zusammenarbeit mit Mann Naturenergie GmbH & Co.KG, September 2004

- /211/ Rumpf, H.: Grundlagen und Methoden des Granulierens. Chem.-Ing.-Technik, Nr. 3, S. 144 – 158, 1958
- /212/ Rumpf, H.; Herrmann, W.: Eigenschaften, Bindungsmechanismen und Festigkeit von Agglomeraten. Aufbereitungstechnik, Nr. 3, S. 117 – 127, 1970
- /213/ Ryckmans, Y.: Large-Scale Usage of Solid Biomass for Power Generation in Belgium. Laborelec-Sustainable Process Technologies, Biomass Trade & Power, Rotterdam (NL), 10. – 12. March 2010
- /214/ Schellinger, H.: Neue Rohstoffpotenziale der Pelleterzeugung – langfristige Chancen für den Heizkesselmarkt. 6. Industrieforum Pellets, Tagungsband, S. 53 – 59, Stuttgart, Oktober 2006
- /215/ Schmidt, B.: Entwicklung des deutschen Pelletmarktes. DEPV, 8. Industrieforum Pellets, Tagungsband, S. 15 – 33, Oktober 2008
- /216/ Schmidt, B.: Entwicklung des deutschen Pelletmarktes. DEPV, 9. Industrieforum Pellets, Tagungsband, S. 9 – 27, Stuttgart, 6. – 7. Oktober 2009
- /217/ Schorch (Hrsg.): Stärke und Wasser als Strukturbestandteile von Extrudaten. <http://schorch.ch>, letzter Zugriff 30. Juli 2011
- /218/ Schrägle, R.: Nutzung von Holzaschen stark reglementiert. Holz-Zentralblatt, DRW-Verlag Weinbrenner GmbH & Co KG, 09. Juli 2010 (ISSN 0018-3792)
- /219/ Schraube, C., Jung, T. et al.: Long-term monitoring of small pellet boiler based heating systems in domestic applications. 18th European Biomass Conference, Lyon (FR), 3. – 7. Mai 2010
- /220/ Schraube, C.: Verbrennungstechnik in Biomasse-Feuerungen bis 50 kW. Europäisches Institut für Energieforschung (EIFER), Workshop – Kurzumtrieb, Miscanthus am LTZ Forchheim, 23. Februar 2010
- /221/ Schubert, H.: Handbuch der mechanischen Verfahrenstechnik: Partikeleigenschaften, Mikroprozesse, Makroprozesse, Zerteilen, Agglomerieren, Trennen, Mischen, Schüttgut. Band 1. Weinheim, Wiley-VCH, 2005
- /222/ Schütt, P.; Schuck, H., J.; Stimm, B. (Hrsg.): Lexikon der Forstbotanik – Morphologie, Pathologie, Ökologie und Systematik wichtiger Baum- und Straucharten. ecomed, München, 1992
- /223/ Schytz, M.: Sustainable Biomass. DONG Energy (DK), Nordic Bioenergy Conference, Jyväskylä (FIN), 5. – 9. September 2011
- /224/ Seidemann, J.: Stärke-Atlas - Grundlagen der Stärke-Mikroskopie und Beschreibung der wichtigsten Stärkearten. Paul Parey in Berlin und Hamburg, 1966
- /225/ Serrano, C.; Monedero, E.; et al.: Effect of moisture content, particle size and pine addition on quality parameters of barley straw pellets. Fuel Processing Technology, No 1-9, 2010
- /226/ Sitzmann, W.; Buschhart, A.; Sternowsky, S.: Energieminimierte Herstellung cofiringtauglichen Biomassepellets. AMANDUS KAHL GmbH & Co.KG, 11. Industrieforum Pellets, Tagungsband, S. 119 – 124, Stuttgart, Oktober 2011
- /227/ Stahl, E.: Qualität und Verwertungsmöglichkeiten von Holzaschen in NRW. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Lehr- und Forschungsgebiet Abfallwirtschaft, Diplomarbeit, Mai 2006
- /228/ Stanev, A.: Reduction of finest particle emissions from small-scale combustion plants with solid biofuels – Results of pilot joint call of projects in Germany. Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe (FNR), 18th European Biomass Conference and Exhibition, Lyon (FR), 3. – 7. Mai 2010

- /229/ Steingaß, H.: Stärkehaltige Futtermittel. Vorlesungsscript „Angewandte Futtermittelkunde“, Institut für Tierernährung der Universität Hohenheim, Sommersemester 2009
- /230/ Stelte, W.; Ahrenfeldt, J. et al.: Pelletizing properties of torrefied biomass - A case study -. Technical University of Denmark and Risø - Danish National Laboratory for Sustainable Energy, 19th European Biomass Conference, Berlin, 06. – 10. Juni 2011
- /231/ Sternowsky, S.: Erfahrungen mit Mischpellets und FuE-Bedarf aus Sicht der (Anlagen-) Hersteller. AMANDUS KAHL GmbH & Co.KG, Fachveranstaltung der FNR, Gülzow, 01. März 2007
- /232/ Struschka, M.: Holzverbrennung in Feuerungsanlagen, Grundlagen – Emissionen – Entwicklung schadstoffarmer Kachelöfen. VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 15, Nr. 108, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1993
- /233/ Swiss Combi: Der SWISS COMBI Bandtrockner setzt die Maßstäbe in der Holzpelletindustrie. Anwendungsbeispiel 040305 der W. Kunz dryTec AG, Dintikon (CH), ohne Datum
- /234/ TA-Luft: Erste allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft), 24. Juli 2002
- /235/ Tegge, G.: Stärke und Stärkederivate. Behr's Verlag, Hamburg, 1988
- /236/ TGA: Heizen mit Holzpellets soll sicherer werden. TGA news 16.02.2011 zur VDI-Richtlinienarbeit, www.tga-fachberater.de, letzter Zugriff 17. Mai 2011
- /237/ Thrän, D. et al.: Nachhaltige Biomassenutzungsstrategien im europäischen Kontext. Institut für Energetik und Umwelt gGmbH (IE), Universität Hohenheim (UH), Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft (BFH) und Öko-Institut e. V. (ÖI), im Auftrag des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit Referat KI I 2, Dezember 2005
- /238/ Thrän, D.; Lenz, V.; et al.: Feinstaubemissionen aus häuslichen Holzfeuerungen - Einflüsse und Minderungsmöglichkeiten -. Erster und Zweiter Zwischenbericht, Forschungsprojekt im Auftrag des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Mai 2006 und April 2007
- /239/ Thrän, D.; Witt, J.: Brennstoffmärkte und Nutzungskonkurrenzen. Fachtagung „Strom und Wärme aus biogenen Festbrennstoffen“, VDI Wissensforum GmbH, VDI-Berichte 2044, S. 53 – 64, Salzburg, 15. und 16. Oktober 2008
- /240/ Tuohiniitty, H.: How to deal with pellet off-gasing – Finnish (-Swedish) experiences. Pelletenergia, Treffen der europäischen Pelletverbände, World Sustainable Energy Days, Wels (AT), 05. März 2010
- /241/ TÜV Rheinland: Für ausreichende Lüftung bei der Lagerung von Holzpellets sorgen. Pressemitteilung 18. Februar 2010
- /242/ Ullmann, M.: Technisch-ökonomische Analyse zur Optimierung der Wirtschaftlichkeit einer Anlage zur Holzpelletherstellung. Diplomarbeit der Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur (HTWK) Leipzig, Fakultät Maschinen- und Energietechnik, in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Biomasseforschungszentrum (DBFZ), Oktober 2010 (unveröffentlicht)
- /243/ Umbera GmbH (Hrsg.): Woodpellets in Europe – State of the Art, Technologies, Activities, Markets. Financed by European Commission in the framework of the EU-Project Thermie B DIS/2043/98-AT, Industrial Network on Wood Pellets, Pölnen (AT), Januar 2000
- /244/ UNECE (Hrsg.): Forest Products Annual Market Review 2007-2008. Geneva Timber and Forest Study Paper 23, United Nations New York and Geneva, 2008

- /245/ van Loo, S.; Koppejan, J.: Handbook of biomass combustion and co-firing. Twente University Press, Enschede (NL), 2002 (ISBN 9036517737)
- /246/ van Soest, J. et al.: Increasing the ash smelting temperature of wood pellets. Meneba B.V., Rotterdam (NL), 2008
- /247/ van Soest, J.; Renirie, J. et al.: New insights in the ash melting behaviour and improvement of biomass energy pellets using Flour Bond. Proceedings of World Bioenergy 2010, Jönköping (SE), 25. – 27. Mai 2010 (ISBN 978-91-977624-1-0)
- /248/ Viessmann: Vitolig Festbrennstoffkessel Nennwärmeleistungsbereich 2,9 – 40 kW. Produktinformation, Viessmann Werke GmbH & Co. KG, Allendorf, August 2006
- /249/ Viessmann: VITOLIG 300 Heizkessel für Holzpellets 2,9 bis 25,9 kW. Datenblatt, Viessmann Werke GmbH & Co. KG, Allendorf, März 2006
- /250/ Vinterbäck, J.: Pell-Sim-dynamic model for forecasting storage and distribution of wood pellets. Biomass and Bioenergy, 27, S. 629 – 643, 2004
- /251/ Warnecke, C.: Entwicklung von Verfahren zur Herstellung von Dämm- und Werkstoffen aus Fichtenrinde bei Verzicht auf synthetische Bindemittel. Dissertation, TU Bergakademie Freiberg, Fakultät für Maschinenbau, Verfahrens- und Energietechnik, September 2009
- /252/ Witt, J.: Normierung von Biobrennstoffen. 18. C.A.R.M.E.N.-Symposium Businessplan Nachwachsende Rohstoffe, Tagungsband, S. 53 – 67, Würzburg, 5. – 6. Juli 2010
- /253/ Wirkner, R.; Witt, J.; Thraen, D.: Woody biomass from short rotation coppice – An option for sustainable feedstock supply. 18th European Biomass Conference and Exhibition, Lyon (FR), 3. – 7. Mai 2010
- /254/ Wirtgen, C.; Aeckersberg, R. et al.: Optimierung der Pelletproduktion. 1. Zwischenbericht des FNR-Forschungsvorhabens (FKZ: 22006104, Laufzeit: 08/2005 – 01/2008), durchgeführt von RWTH Aachen, Institut für Energetik und Umwelt (IE), MANN Engineering, Dezember 2005
- /255/ Wirtgen, C.; Aeckersberg, R. et al.: Optimierung der Pelletproduktion. 2. Zwischenbericht des FNR-Forschungsvorhabens (FKZ: 22006104, Laufzeit: 08/2005 – 01/2008), durchgeführt von RWTH Aachen, Institut für Energetik und Umwelt (IE), MANN Engineering, Juli 2006
- /256/ Witt, J.; Kaltschmitt, M.: Biomass Pellets for the Power Plant Sector – A Market Analysis. VGB PowerTech, Nr. 9, S. 94 – 101, 2007
- /257/ Witt, J.; Lenz, V.: Holzmischpellets – Eine Chance für den Kleinverbrauchermarkt?. 7. IndustrieForum Pellets, Tagungsband, S. 76 – 83, Stuttgart, Oktober 2007
- /258/ Witt, J.; Rensberg, N. et al.: Analyse des heutigen und zukünftigen Marktpotenzials von Holzpellets im deutschen und europäischen Kontext. Endbericht (unveröffentlicht), Deutsches BiomasseForschungsZentrum (DBFZ), Industrienauftrag, Leipzig, Dezember 2009
- /259/ Witt, J.; Schlaug, W.; Aeckersberg, R.: Optimierung der Holzpelletproduktion für Kleinfeuerungsanlagen. 8. IndustrieForum Pellets, Tagungsband, S. 114 – 119, Stuttgart, Oktober 2008
- /260/ Witt, J.; Thrän, D. et al.: Marktexpertise Biomassebereitstellung und –nutzung. Endbericht (unveröffentlicht), Institut für Energetik und Umwelt (IE), Industrienauftrag, Leipzig, Juni 2008
- /261/ Witt, J.; Thrän, D.: Optimising the wood pellet supply by involving sustainability requirements. 17th European Biomass Conference, Hamburg, 01. Juli 2009

- /262/ Witt, J.; Wirkner, R.; Thrän, D.: Nachhaltigkeitsaspekte und –anforderungen in einem internationalen Pelletmarkt. 8. Industrieforum Pellets, Tagungsband, S. 144 – 150, Stuttgart, Oktober 2008
- /263/ Wopienka, E.: Holzpellets auf dem Prüfstand. pellets Markt und Trends, Ausgabe 05, S. 44 – 47, Oktober 2009
- /264/ Wright, R. H.: Effect of lignin content and extractives on the higher heating value of wood. Wood and Fiber Science, No 19 (4), S. 446 – 452, 1987
- /265/ Zobelein, H. (Hrsg.): Starch und Starch. Dictionary of Renewable Resources. 2. Auflage, Wiley-VCH, Weinheim und New York; S. 265 – 266, 1996 (ISBN 3-527-30114-3)
- /266/ Zuberbühler, U.: Maßnahmen zur feuerungsseitigen Emissionsminderung bei der Holzverbrennung in gewerblichen Feuerungsanlagen. Dissertation, Universität Stuttgart, Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen, Bericht Nr. 50, 2002

GLOSSAR

Begriff	Definition / Beschreibung
Agglomeration	Beim Agglomerationsprozess wird körniges oder fasriges Material in eine kompakte stückige Form gepresst (z. B. Pellets, Briketts), um dessen Gebrauchseigenschaften zu verbessern. Durch die mechanische Zusammenführung der Partikeln/Fasern unter Druck und Temperatureinwirkung werden die Haftkräfte im Materialverbund verstärkt und eine Kornvergrößerung erreicht, wobei die freie Partikeloberfläche reduziert wird /185/.
Biomasse	Als Biomasse wird die Gesamtheit in einem Lebensraum vorkommender, organischer Substanzen bezeichnet, wobei zwischen Phyto- und Zoomasse unterschieden wird /103/. Biogene Brennstoffe stellen nur den Anteil des Gesamtaufkommens an Biomasse dar, der zur energetischen Nutzung eingesetzt werden kann, um daraus Strom, Wärme oder Kraftstoffe bereitzustellen. Sie können anhand ihres Aggregatzustandes in feste, flüssige und gasförmige Bioenergieträger untergliedert werden.
Brennstofffestigkeit	Die Fähigkeit eines mit Druck komprimierten Brennstoffs bei Beanspruchung in seiner definierten Form zu verbleiben /187/. Als Maß für die Brennstofffestigkeit gilt die mechanische Festigkeit, bei der anhand von Abriebtests der Feinanteil (< 3,15 mm) des Brennstoffs bei definierten Konditionen bestimmt wird /39/.
Gütezeichen (GZ)	Gütezeichen präsentieren Bildmarken oder Labels von Qualitätssicherungssystemen, wozu sowohl Zertifizierungs- als auch Prüfprogramme oder Attestierungen zählen.
Kleinf Feuerungsanlage (KFA)	Entsprechend den Geltungsbereichen der Emissionsanforderungen der 1. BImSchV zum Einsatz von Holzpellets werden innerhalb dieser Arbeit alle Kleinst- und Kleinf Feuerungsanlagen bis 50 kW Nennwärmeleistung mit KFA bezeichnet /18/, /19/.
Pelletierung / Pellets / Premiumpellets	<p><i>Pelletierung.</i> Die Pelletierung ist ein Agglomerationsverfahren, bei dem loses körniges oder faseriges Material mit einer geringen Schüttdichte zu kompaktem Presslingen mit einer hohen Rohdichte verpresst wird. Dafür muss das Rohmaterial vor der Pelletierung gegebenenfalls zerkleinert, getrocknet und konditioniert werden, wobei eine Zumischung von Bindemitteln oder Zuschlagstoffen möglich ist /96/, /103/.</p> <p><i>Pellets.</i> Pellets haben typischer Weise eine zylindrische Form mit einem Durchmesser bis 25 mm, einer Länge von 5 bis 40 mm und weisen gebrochene Enden auf. In der Praxis werden standardmäßig Holzpellets mit 6 mm Durchmesser für den Einsatz in Kleinf Feuerungsanlagen angeboten. Pellets grenzen sich gegenüber Briketts durch ihren kleineren Durchmesser (Briketts ≥ 25 mm) sowie die rieselfähigen Form des Schüttguts ab /39/, /187/.</p> <p><i>Premiumpellets.</i> Für den Begriff „Premiumpellets“ gibt es keine offizielle Definition. Allgemein werden normierte Pellets, die nicht für die industrielle Nutzung bestimmt sind, so bezeichnet. In der Regel werden sie aus chemisch unbehandeltem Holz hergestellt und enthalten keine oder nur marginale Mengen an Rinde. Sie besitzen einen geringen Aschegehalt und eine hohe Abriebfestigkeit. Premiumpellets sind für den Einsatz in automatisch bestückten Öfen sowie in Heizkesseln im unteren bis mittleren Leistungsbereich vorgesehen und entsprechen in der Regel den Anforderungen der DIN EN 14961-2, Klasse A1 bzw. A2 (Tabelle A-3).</p> <p><i>Industriepellets.</i> Industriepellets können individuell abgestimmte Brennstoffeigenschaften besitzen. Gegenüber Premiumpellets weisen sie zum Teil geringere Brennstoffanforderungen auf. Sie werden meist in größeren Heiz-</p>

oder (Heiz-)Kraftwerken eingesetzt, die über eine robustere Brennstoffzuführung, eine flexiblere Regelungstechnik und in der Regel auch mit Abgasaufbereitungskomponenten ausgestattet sind. Damit steht der Industriepelletproduktion ein größeres Rohstoffspektrum als der Premiumpelletherstellung zur Verfügung.

Qualität / Brennstoffqualität

Als „Qualität“ wird eine realisierte Beschaffenheit einer Einheit (z. B. ein Brennstoff) bezüglich ihrer Qualitätsanforderungen bezeichnet, wobei zwischen dem Zustand oder der Fähigkeit eines Produktes und einer Leistung unterschieden werden kann /37/, /127/.

Somit bezieht sich die Brennstoffqualität im Rahmen der Arbeit auf die Realisierung / Erreichung der Brennstoffanforderungen, die im Rahmen von Brennstoffstandards erarbeitet wurden.

A ANHANG

A.1 Technisches Rohstoffpotenzial zur Holzpelletproduktion

für die Pelletproduktion werden typischer Weise überwiegend regional anfallende Rohstoffe verwendet. Je nach Verfügbarkeit unterscheiden die sich jedoch sowohl in ihrer Holzart als auch im Holzsortiment (Späne, Rinde, HHS)³⁵, wobei weitgehend lokal vorherrschende Baumarten eingesetzt werden. So sind beispielsweise Weichhölzer wie Fichte und Kiefer typische Rohstoffe für die Holzpelletproduktion in Mitteleuropa, Skandinavien und dem Baltikum, während Hart-hölzer wie Birke, Buche oder Eiche eher selten eingesetzt werden. Eiche kommt dagegen häufig in Osteuropa und Spanien zum Einsatz /263/.

In Tabelle A-1 wird das technisch verfügbare Rohstoffpotenzial³⁶ für die Holzpelletproduktion in Deutschland und der EU vorgestellt. Als Datengrundlage der szenario-spezifischen Potenzialbe-trachtung wurde das „current policy“ Szenario der Studie /237/ zu Grunde gelegt, in dem die Beibehaltung wesentlicher politischer Zielstellungen bis zum Jahr 2020 vorausgesetzt wird.

Das technische Rohstoffpotenzial zur Holzpelletproduktion in Deutschland beträgt etwa 8 bis 18 Mio. t/a. Das entspricht rund 53 bis 120 Pelletwerken mit einer Pelletproduktionskapazität 150 Mio. t im Jahr. In den EU-28-Staaten beträgt das technische Rohstoffpotenzial einer Pellet-produktion von bis zu 590 Mio. t Holzpellets. Dabei liegen die größten Potenziale im Bereich der Waldrestholznutzung und des Energieholzanbaus, das (anteilig) zur Produktion von Pellets zum Einsatz im mittleren und höheren Leistungsbereich genutzt werden kann oder als Industrie-holzpellets Verwendung findet. Diesem Potenzial wird über dem Betrachtungszeitraum bis zum Jahr 2020 ein weiteres Wachstum prognostiziert. Aufgrund des perspektivischen Anstiegs der Biomassenachfrage unterliegt es jedoch auch den größten Unsicherheiten hinsichtlich seiner tat-sächlichen Verfügbarkeit zur Pelletproduktion /45/, /237/.

Tabelle A-1: Technisches Potenzial zur Holzpelletproduktion im Jahr 2010, in Anlehnung an /45/

		EU-28	Deutschland
Holzpellets für den Kleinverbrauchermarkt / Pre-miumpellets ^{a)}	TWh/a Mio. t/a	ca. 200 ca. 40	28 – 30 5 – 6
Holzpellets für den mittleren und höheren Leis-tungsbereich ^{b)}	TWh/a Mio. t/a	130 – 390 25– 80	15 – 60 3 – 12
Potenzial zur Holzpelletproduktion (gesamt) ^{c)}	TWh/a Mio. t/a	330 - 590 65 – 120	43 – 90 8 – 18
Holzpelletproduktionsstandorte	Anzahl ^{d)}	430 – 800	53 – 120

^{a)} Rohmaterial kann die Brennstoffanforderungen nach EN 14961-2, Klasse A1 bzw. A2 erfüllen

^{b)} Rohmaterial kann mindestens die Brennstoffanforderungen der EN 14961-2, Klasse B erfüllen (die anteilige Zumischungen zur Produktion von A1+A2 Pellets ist teilweise möglich) bzw. kann zur Industriepelletproduktion verwendet werden

^{c)} nicht in die Potenzialabschätzung eingeflossen sind Landschaftspflegehölzer, Wurzeln / Stümpfe und chemisch behandelte Hölzer bzw. Reststoffe

^{d)} bei einer Produktionskapazität pro Standort von jeweils 150 000 t im Jahr

³⁵ Beispielsweise fallen in einem Sägewerk bei der Nutzung eines Holzstammes durchschnittlich 16 % Späne, 30 % HHS und 8 % Rinde an /67/.

³⁶ Das technische Potenzial beschreibt den Anteil des theoretischen Potenzials der insgesamt verfügbaren Biomasse, der unter Berücksichtigung der gegebenen stofflichen Biomassennutzung (Nahrungs-, Futtermittel und Holzverarbeitung etc.) sowie struktu-reller und ökologischer Restriktionen (Erhaltung von Stoffkreisläufen, Flächenansprüche der Biotopvernetzung etc.) mit den derzeit verfügbaren Technologien nutzbar ist /109/. Die dargestellten Energieträgerpotenziale berücksichtigen ausschließlich thermo-chemische Umwandlungsprozesse.

A.2 Kennwerte zur Rohstoffcharakterisierung

In Ergänzung zu Kapitel 2.2 stellt Tabelle A-2 weitere Kennwerte zur Holzcharakterisierung vor.

Tabelle A-2: Rohdichten von absolut trockenem Holz („Darrdichte“) /103/

Weichhölzer (bis 550 kg/m ³)		Harthölzer (über 550 kg/m ³)	
Fichte	430 kg/m ³	Eiche	670 kg/m ³
Tanne	410 kg/m ³	Bergahorn	500 kg/m ³
Weißkiefer	490 kg/m ³	Esche	670 kg/m ³
Douglasie	470 kg/m ³	Buche	680 kg/m ³
Lärche	550 kg/m ³	Birke	640 kg/m ³
Erle	490 kg/m ³	Hainbuche/Weißbuche	750 kg/m ³
Linde	490 kg/m ³	Schwarzkiefer	560 kg/m ³
Espe (Aspe)/ Zitterpappel	450 kg/m ³	Hasel	560 kg/m ³
Pappel	410 kg/m ³	Robinie	730 kg/m ³
Weide	520 kg/m ³	Ulme	640 kg/m ³

A.3 Internationale pelletrelevante Regelwerke

In Ergänzung zu den Erläuterung zu Brennstoffnormen und Qualitätssicherungssystemen (Kapitel 2.1.2) erfolgt hier in Kapitel A.3.1 eine Übersicht zu den bereits existierenden und derzeit in Erarbeitung befindlichen Regelwerken mit Brennstoffanforderungen an Pellets. Die Verfügbarkeit weiterer Regelwerke mit Bezug auf biogene Brennstoffpellets zeigt Kapitel A.3.2.

A.3.1 Brennstoffanforderungen

In Tabelle A-3 sind nationale und internationale Regelwerke mit Brennstoffanforderungen an Holzpellets zum Einsatz in Kleinfeuerungsanlagen in Tabelle A-4 zu sonstigen Biomassepellets zur energetischen Nutzung vorgestellt.

Tabelle A-3: Brennstoffanforderungen an Holzpellets zum Einsatz in KFA (Stand, Nov. 2011) /4/, /5/, /24/, /44/, /42/, /49/, /156/, /163/, /164/, /188/, /198/

Land		Deutschland		Österreich		Schweiz ¹⁾	Italien	Frankreich	Schweden ¹⁾	Skandinavien ¹⁾	EU		USA						
Norm / Gütezeichen (GZ) eingeführt seit letzte Aktualisierung		Norm: 1996 / 1997	GZ 2004 2007	Norm 1990 2000	GZ 1997 2007 2009	GZ gültig bis 2006	GZ 2006	GZ 2009	Norm 1998	GZ 2005 2007	Norm / GZ EN-Norm ab 2011 gültig; GZ seit 2010 gültig		Norm / GZ 2008						
Bezeichnung		Norm: DIN 51731 ¹⁾ GZ: DINgeprüft	DINplus ²⁾ (gültig bis 2010, Bezug auf DIN 51731 + ÖNORM M 7135)	ÖNORM M 7135	ÖNORM geprüft	Umweltzeichen UZ 38	Swiss-pellets	Pellet Gold ¹⁾	NF 434: "Marque NF Granulés biocombustibles"	SS 187120	Swan ²⁾ (Nordic Ecolabelling)	Norm: EN 14961-2 GZ: ENplus ⁹⁾ für A1 und A2 ; GZ: DINplus (2010) nur A1; GZ: Blauer Engel nur A1		PFI Standard Specification for Residential/ Commercial Densified Fuel / GZ: PFI QA/QC Program ⁴⁾					
Klasse		HP5	HP5 ⁴⁾ / HP1 ⁵⁾	HP 1					Bois premium	Group I	class I + II	A1	A2	Super Premium	Premium				
Rohmaterial		naturbelassenes Holz einschließl. Rinde	naturbelassenes Holz oder Rinde	naturbelassenes Holz		unbehandeltes bzw. naturbelassenes Holz & Nebenprodukte der Holzindustrie ¹⁾		Stammholz, chem. unbehandeltes IRH ohne Rinde, chem. unbehandeltes Altholz ohne Rinde ²⁾	Holz	unbelastete Biomasse	Stammholz, chem. unbehandelte Rückstände aus der Holzindustrie ^{3,4,5)}	Stammholz, chem. unbehandelte Rückstände aus der Holzindustrie ⁷⁾	Vollbäume ohne Wurzeln, Stammholz, WRH, Rinde, chem. unbehandelte Rückstände aus der Holzindustrie ⁸⁾	chemisch unbehandeltes Material					
Kennwerte		Einheit	Hinweis: Für die Ermittlung der Brennstoffkennwerte werden z.T. unterschiedlichen Prüfmethode ausgewiesen und angewendet, was die Vergleichbarkeit der Grenz- und Analysewerte einschränkt. Alle Angaben ohne Gewähr.																
Stückigkeit		Durchmesser Länge	D L	mm mm	4 - 10 < 50	4 ≤ D < 10 ≤ 5 x D ¹⁾	4 ≤ D < 10 ≤ 5 x D ¹⁾	4 ≤ D < 10 ≤ 5 x D	5 - 7 < 50	-	6 ± 1 5 ≤ L ≤ 30	-	class I: ≤ 6 ± 0,5 class II: ≤ 8 ± 0,5	D 6 ± 1 oder D 8 ± 1 ¹⁾ 3,15 ≤ L ≤ 40 ²⁾	D 6 ± 1 oder D 8 ± 1 ¹⁾ 3,15 ≤ L ≤ 40 ²⁾	6,35 bis 7,25 ¹⁾ ≤ 1% > ~ 38,1 ¹⁾	6,35 bis 7,25 ¹⁾ ≤ 1% > ~ 38,1 ¹⁾		
Wassergehalt		W	%	≤ 12	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 8	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 6	≤ 8		
Aschegehalt		A	% (TM)	≤ 1,5	≤ 0,5 ²⁾	≤ 0,5 ²⁾	≤ 0,5 ²⁾	≤ 1,0	≤ 1	≤ 0,7	≤ 0,7	≤ 0,5	≤ 0,7	≤ 0,7	≤ 1,5	≤ 0,5	≤ 1		
Heizwert		Hi	MJ/kg	17,5 - 19,5 ²⁾	≥ 18 ²⁾	≥ 18 ²⁾	≥ 18 ²⁾	≥ 18	> 16,9 ³⁾	16,7 ¹⁾	> 16,9 ²⁾	≥ 17,1	≥ 16,5 < Hi < 19 ³⁾	≥ 16,3 < Hi < 19 ³⁾	≥ 19,5 ²⁾	≥ 19,5 ²⁾			
Mechan. Festigkeit ¹⁾		DU	%	-	(97,7)	(> 97,7)	(97,7)	-	(≥ 97,7)	97,5	-	≥ 97,5	≥ 97,5	≥ 97,5	≥ 97,5	≥ 97,5	≥ 97,5		
Abrieb ^{1,2)}			%	-	2,3 ⁶⁾	≤ 2,3	2,3	≤ 4,5	2,3	(2,5)	-	(< 2,5)	(< 2,5)	(< 2,5)	(< 2,5)	(< 2,5)	(< 2,5)		
Feinanteil ²⁾		F	%	-	-	-	-	-	-	≤ 1 ³⁾	≤ 0,8	≤ 1,0	≤ 1 ⁵⁾ (≤ 0,5 ⁶⁾	≤ 1 ⁵⁾	≤ 0,5	≤ 0,5			
Presshilfsmittel / Zuschlagstoffe		PHM	%	nicht zulässig	≤ 2 ⁶⁾	≤ 2 ⁶⁾	≤ 2	keine	< 2 ⁴⁾	2 ²⁾	kein Grenzwert ³⁾	≤ 2 ⁶⁾	≤ 2 ⁴⁾	≤ 2 ⁴⁾	≤ 2 ⁴⁾	≤ 2 ⁴⁾			
Schüttdichte		BD	kg/m ³	-	-	-	-	-	> 600	≥ 650	≥ 600	I: 630 < BD ≤ 700 II: 700 < BD ≤ 780	≥ 600	≥ 600	~ 640 bis ~ 737 ¹⁾	~ 640 bis ~ 737 ¹⁾			
Rohdichte			kg/dm ³	1,0 - 1,4	≥ 1,12	≥ 1,12 ³⁾	≥ 1,12	1,15 - 1,4	> 1,15	-	-	-	-	-	-	-			
Ascheschmelzverhalten ³⁾			°C	-	-	-	-	-	-	-	IT ist anzugeben	IT ≥ 1300 HT ≥ 1400	bei EN ist SST, DT, HT und FT informativ; bei DINplus und ENplus ist DT normativ ⁷⁾	ist zu dokumentieren	ist zu dokumentieren				
Stickstoff		N	%	≤ 0,3	≤ 0,3 ²⁾	≤ 0,3 ²⁾	≤ 0,3 ²⁾	≤ 0,3	≤ 0,3 ³⁾	0,3 ⁴⁾	-	≤ 0,3	≤ 0,3	≤ 0,5	-	-			
Schwefel		S	%	≤ 0,08	≤ 0,04 ²⁾	≤ 0,04 ²⁾	≤ 0,04 ²⁾	≤ 0,04	≤ 0,05 ³⁾	0,05 ⁴⁾	≤ 0,08 ⁴⁾	≤ 0,03	≤ 0,03	≤ 0,03	-	-			
Chlor		Cl	%	≤ 0,03	≤ 0,02 ²⁾	≤ 0,02 ²⁾	≤ 0,02 ²⁾	≤ 0,02	< 0,03 ³⁾	0,03 ⁴⁾	≤ 0,03 ⁴⁾	≤ 0,02	≤ 0,02	≤ 0,02	≤ 0,0003 ¹⁾	≤ 0,0003 ¹⁾			
Arsen		As	mg/kg (TM)	≤ 0,8	< 0,8	-	-	≤ 0,8	< 0,8	≤ 1	-	-	≤ 1,0	≤ 1,0	-	-			
Cadmium		Cd	mg/kg (TM)	≤ 0,5	< 0,5	-	-	≤ 0,5	< 0,5	≤ 0,5	-	-	≤ 0,5	≤ 0,5	-	-			
Chrom		Cr	mg/kg (TM)	≤ 8	< 8	-	-	≤ 8	< 8	≤ 10	-	-	≤ 10	≤ 10	-	-			
Kupfer		Cu	mg/kg (TM)	≤ 5	< 5	-	-	≤ 5	< 5	≤ 10	-	-	≤ 10	≤ 10	-	-			
Blei		Pb	mg/kg (TM)	≤ 10	< 10	-	-	≤ 10	< 10	≤ 10	-	-	≤ 10	≤ 10	-	-			
Quecksilber		Hg	mg/kg (TM)	≤ 0,05	< 0,05	-	-	≤ 0,05	< 0,05	≤ 0,05	-	-	≤ 0,1	≤ 0,1	-	-			
Nickel		Ni	mg/kg (TM)	-	-	-	-	-	-	≤ 10	-	-	≤ 10	≤ 10	-	-			
Zink		Zn	mg/kg (TM)	≤ 100	< 100	-	-	≤ 100	< 100	≤ 100	-	-	≤ 100	≤ 100	-	-			
zusätzliche Parameter				EOX ³⁾ : 3 mg/kg (TM)			EOX: 3 mg/kg (TM)	EOX: 3 mg/kg (TM)	Na < 0,03 mg/kg (TM), Formaldehydgehalt normativ (mg/100g)			max. 1200 kW Primärenergieeinsatz/ t Pelletproduktion	*) unterschiedliche Anforderungen an Veraschungstemperatur bei Norm und GZ beachten; bei ENplus ist DT für A1 auf ≥ 1200°C, für A2 auf ≥ 1100°C begrenzt						
Erläuterungen		TM: Trockenmasse 3) def. Ascheschmelztemperatur: SST: shrinkage starting temp. (IT: initial deformation temp.); DT: softening/ deformation temp.; HT: hemis-phe temp., FT: flow temp.		1) gilt auch in CH als: SN 166000 2) wasser- & aschefrei 3) extrahierbare organ. gebundene Halogene		1) max 20 Mass-% = L bis 7,5 x D 2) wasserfrei 3) Abweichungen von 0,2 erlaubt 4) chem. unveränderte Produkte aus primären land- & forswirtschaftl. Biomassen		1) Rohstoff muss im Jahr zu 70% aus nachhaltiger Forstwirtschaft sein (PEFC/FSC oder anderen anerkannten Zertifizierungssysteme) 2) der seit 2001 in CH gültige Pelletstandard SN 166000 ist iden-tisch mit der DIN 51731		1) basierend auf prEN 14961-2, PFI, DINplus und ÖNORM M7135 2) lt. prEN 14961-1: 1.1.2.1; 1.1.2 3) wasserfrei 4) Art & Anteil		1) Lieferzustand 2) Art (mineralisch/ organisch) und Anteil müssen angegeben werden 3) am Werksausgang 4) wasserfrei		1) gilt auch in NOR (NS 3165) und FIN 2) im Lieferzustand 3) Art & Menge angeben 4) wasserfrei		1) D wahlweise, muss angegeben werden 2) max. 1 % darf länger als 40 mm sein, max. Länge < 45 mm 3) frisch 4) Art & Menge ist anzugeben 5) vor Abfüllung in BigBags bzw. als Sackware sowie vor der Verladung loser Pellets ab Werk bzw. vor Auslieferung an den Endverbraucher 6) gilt zusätzlich bei DINplus-Sackware bis 20 kg vor Auslieferung der Ware am Werkstor 7) lt. prEN 14961-1: 1.1.3 und 1.2.1 8) lt. prEN 14961-1: 1.1.4, 1.2.1.5 und 1.2.1 9) ENplus in DE, CH+AT eingeführt, wird sich zukünftig auf weitere Märkte erstrecken		1) ≤ 300 ppm (Originalwert umgerechnet) 2) muss angegeben werden (BTU/pound) 3) Art muss angegeben werden 4) PFI Quality assurance/quality control (QA/QC) Program ; ist nicht für den Überseetransport anwendbar	

Tabelle A-4: Weitere Brennstoffanforderungen an Biomassepellets (Stand Nov. 2011) /4/, /5/, /44/, /42/, /52/, /156/, /163/, /164/, /188/, /189/

Land		Deutschland	Österreich				Schweden ¹⁾		Frankreich				EU					USA		Weißrusland		
Norm / Gütezeichen (GZ) eingeführt seit letzte Aktualisierung		Norm / GZ 1996 / 1997	Norm 1990 2000		Norm 2007	Norm 1998		Gütezeichen 2008				Norm / GZ 2011	Norm für Ende 2011 erwartet					Norm / GZ 2008	Industrie-Norm			
Bezeichnung		Norm: DIN 51731 ¹⁾ GZ: DINgeprüft	ÖNORM M 7135			ÖNORM C 4000	SS 187120		NF 434: "Marque NF Granulés biocombustibles"				Norm: EN 14961-2 GZ: EN B	prEN 14961-6 (Stand Juni 2010)					PFI Standard Specification for Residential/Commercial Densified Fuel / PFI QA/QC Program ⁴⁾		TU RB 600012401.002 - 2004	
Klasse		HP 4	Holz-pellets 2	Rinden-pellets 1	Rinden-pellets 2	Miscanthus-pellets	Group 2	Group 3	Bois standard	Bois industriel	Agro+	Agro	B	Stroh	Miscanthus	Rohr-glanzgras	class A*	class B*	Standard	Utility		
Rohmaterial		naturbelassenes Holz einschließlich anhaftender Rinde	unbehandeltes Holz	unbehandelte Rinde		Miscanthus - Ganzpflanze gemäß prEN 14961-1	unbelastete Biomasse		Holz		kraut- & fruchtartige Biomasse aus der Landwirtschaft		Wald- & Plantagenholz, Rückstände aus der Holzindustrie, Gebrauchtholz ^{5,7)}	halmgutartige Biomasse aus Landwirtschaft und Gartenbau (*nicht spezifizierte Biomassen oder Mischungen können der Qualitätsklasse A+B zugeordnet werden ⁶⁾)					chemisch unbehandeltes Material			
Kennwerte		Einheit	Hinweis: Für die Ermittlung der Brennstoffkennwerte werden z.T. unterschiedlichen Prüfmethode ausgewiesen und angewendet, was die Vergleichbarkeit der Grenz- und Analysewerte einschränkt. Alle Angaben ohne Gewähr.																			
Stückigkeit	Durchmesser	D	mm	10 - 40	10 ≤ D < 40	4 ≤ D < 10 ⁶⁾	10 ≤ D < 40	D06: 6 ± 1 ¹⁾ D08: 8 ± 1 D10: 10 ± 1 D06: L ≤ 30 ¹⁾ D08: L ≤ 35 D10: L ≤ 40	-	-	6 ≤ D ≤ 9 ± 1	6 ≤ D ≤ 16	6 ≤ D ≤ 8 ± 1	6 ≤ D ≤ 16 ± 1	6 ± 1 8 ± 1 ¹⁾	D 6 ± 1 D 8 ± 1 D 10 ± 1 ¹⁾	6 ± 1 8 ± 1 ¹⁾	6 ± 1 8 ± 1 ¹⁾	6,35 bis 7,25 ¹⁾		8 - 9	
	Länge	L	mm	< 100	≤ 4 x D ¹⁾	≤ 5 x D ¹⁾	≤ 4 x D ¹⁾		≤ 5 x D	≤ 6 x D	5 ≤ L ≤ 30	5 ≤ L ≤ 50	10 ≤ L ≤ 30	10 ≤ L ≤ 30	3,15 ≤ L ≤ 40 ²⁾	3,15 ≤ L ≤ 40 ³⁾	3,15 ≤ L ≤ 40 ³⁾	3,15 ≤ L ≤ 40 ³⁾	≤ 1% ~ 38,1 ¹⁾		30 - 50	
Wassergehalt	W	%	≤ 12	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 12	≤ 10	≤ 15	≤ 11	≤ 15	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 12	≤ 12	≤ 15	≤ 10	≤ 8	≤ 12
Aschegehalt	A	% (TM)	≤ 1,5	≤ 0,5 ²⁾	≤ 0,5 ²⁾	≤ 0,5 ²⁾	A4.0: ≤ 4 ¹⁾ A6.0: ≤ 6	≤ 1,5	≤ 1,5	≤ 1,5	≤ 3	≤ 5	≤ 7	≤ 3,5	A6.0: ≤ 6 ³⁾ A6.0+: >6	A4.0: ≤ 4 ⁸⁾ A6.0: ≤ 6	A8.0: ≤ 8 ⁸⁾ A8.0+: >8	≤ 5	≤ 10	≤ 2	≤ 6	≤ 1,5
Heizwert	Hi	MJ/kg	17,5 - 19,5 ²⁾	≥ 18 ²⁾	≥ 18 ²⁾	≥ 18 ²⁾		>16,9 ²⁾	>16,9 ²⁾	16,2 ¹⁾	15,2 ¹⁾	15,5 ¹⁾	14,7 ¹⁾	≥ 16,0 ³⁾ < Hi < 19	Hi _{min} ist anzugeben	≥ 14,5 ³⁾	≥ 14,1 ³⁾	≥ 13,2 ³⁾			≥ 16,9	
Mechan. Festigkeit ¹⁾	DU	%	-	-	(≥ 97,7)	-	≥ 97,5	-	-	≥ 95	≥ 95	≥ 95	≥ 92	≥ 96,5	≥ 97,5	≥ 97,5	≥ 96,5	≥ 97,5	≥ 96,0	≥ 97,5	≥ 97,5	-
Abrieb ^{1,2)}		%	-	-	≤ 2,3	-	(≤ 2,5)	-	-	(≤ 5)	(≤ 5)	(≤ 5)	(≤ 8)	(≤ 3,5)	(≤ 2,5)	(≤ 2,5)	(≤ 3,5)	(≤ 2,5)	(≤ 4,0)	(≤ 2,5)	(≤ 2,5)	-
Feinanteil ²⁾	F	%	-	-	-	-	≤ 1	1,5	1,5	≤ 2 ³⁾	≤ 3 ³⁾	≤ 2 ³⁾	≤ 3 ³⁾	≤ 1 ⁵⁾	≤ 1 ⁵⁾	≤ 1 ⁵⁾	≤ 2 ⁵⁾	≤ 3 ⁵⁾	≤ 0,5	≤ 0,5	-	
Presshilfsmittel / Zuschlagstoffe	PHM	%	nicht zulässig	≤ 2	≤ 2	≤ 2	³⁾	kein Grenzwert ³⁾		2 ²⁾	3 ²⁾	3 ²⁾	3% ²⁾	≤ 2 ⁴⁾	⁴⁾ z. B. Stärke, Getreide- oder Kartoffelmehl, Pflanzenöl					³⁾	³⁾	-
Schüttdichte	BD	kg/m ³	-	-	-	-	≥ 580	≥ 500	≥ 500	≥ 650	≥ 650	≥ 650	≥ 650	≥ 600	≥ 600	≥ 580	≥ 550	≥ 600	≥ 600	609 bis ~ 737 ¹⁾	609 bis ~ 737 ¹⁾	500-650
Rohdichte		kg/dm ³	1,0 - 1,4	≥ 1,0	≥ 1,12 ⁴⁾	≥ 1,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ascheschmelzverhalten ³⁾		°C	-	-	-	-	> 800	IT ist anzugeben		-	-	≥ 1000	≥ 800	bei EN ist SST, DT, HT und FT informativ zu dokumentieren; bei GZ: EN B ist DT normativ anzugeben ⁷⁾					³⁾ ist zu dokumentieren	-		
Stickstoff	N	%	0,3	≤ 0,3 ²⁾	≤ 0,6 ²⁾	≤ 0,6 ²⁾	≤ 0,5	≤ 0,3 ⁵⁾	≤ 0,3 ⁵⁾	0,3 ⁴⁾	0,5 ⁴⁾	1,5 ⁴⁾	1,5 ⁴⁾	≤ 1,0	≤ 0,7	≤ 0,5	≤ 1,0	≤ 1,5	≤ 2,0	-	-	-
Schwefel	S	%	0,08	≤ 0,04 ²⁾	≤ 0,08 ²⁾	≤ 0,08 ²⁾	≤ 0,05	≤ 0,08 ⁵⁾	⁴⁾	0,08 ⁴⁾	0,08 ⁴⁾	0,2 ⁴⁾	0,2 ⁴⁾	≤ 0,04	≤ 0,1	≤ 0,05	≤ 0,2	≤ 0,2	≤ 0,2	-	-	-
Chlor	Cl	%	0,03	≤ 0,02 ²⁾	≤ 0,04 ²⁾	≤ 0,04 ²⁾	≤ 0,07	≤ 0,03 ⁵⁾	⁴⁾	0,05 ⁴⁾	0,05 ⁴⁾	0,2 ⁴⁾	0,2 ⁴⁾	≤ 0,03	≤ 0,1	≤ 0,08	≤ 0,1	≤ 0,2	≤ 0,3	≤ 0,0003 ¹⁾	≤ 0,0003 ¹⁾	-
Arsen	As	mg/kg (TM)	0,8	-	-	-	-	-	-	≤ 1	≤ 1	≤ 1	≤ 1	≤ 1,0	≤ 1,0	≤ 1,0	≤ 1,0	≤ 1,0	≤ 1,0	-	-	-
Cadmium	Cd	mg/kg (TM)	0,5	-	-	-	-	-	-	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	-	-	-
Chrom	Cr	mg/kg (TM)	8	-	-	-	-	-	-	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 50	≤ 50	≤ 50	≤ 50	≤ 50	-	-	-
Kupfer	Cu	mg/kg (TM)	5	-	-	-	-	-	-	≤ 10	≤ 10	≤ 40	≤ 40	≤ 10	≤ 20	≤ 20	≤ 20	≤ 20	≤ 20	-	-	-
Blei	Pb	mg/kg (TM)	10	-	-	-	-	-	-	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10	-	-	-
Quecksilber	Hg	mg/kg (TM)	0,05	-	-	-	-	-	-	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1	-	-	-
Nickel	Ni	mg/kg (TM)	-	-	-	-	-	-	-	≤ 10	≤ 10	≤ 15	≤ 15	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10	-	-	-
Zink	Zn	mg/kg (TM)	100	-	-	-	-	-	-	≤ 100	≤ 100	≤ 60	≤ 60	≤ 100	≤ 60	≤ 60	≤ 60	≤ 60	≤ 60	-	-	-
zusätzliche Parameter		EOX ³⁾ : 3 mg/kg (TM)					aschebildende Elemente informativ								*) unterschiedliche Anforderungen an Versuchsstemperatur bei Norm und GZ beachten; bei EN B ist DT auf ≥ 1100°C begrenzt							
Erläuterungen		TM: Trockenmasse ¹⁾ def. Ascheschmelztemp.: SST: shrinkage starting temp. (IT: initial deformation temp.); DT: deformation temp.; HT: hemisphere temp.; FT: flow temp.	¹⁾ gilt in CH als: SN 166000 ²⁾ wasser- & aschefrei (warf) ³⁾ extrahierbare organisch gebundene Halogene	¹⁾ max 20 Mass.-% = L bis 7,5 x D ²⁾ wasserfrei ³⁾ bis zu 0,8% wenn bereits das unbehandelte Rohholz einen höheren Aschegehalt aufweist ⁴⁾ Abweichungen von 0,02 erlaubt	¹⁾ Klasse ist anzugeben ²⁾ Heizwert im Lieferzustand informativ ³⁾ Art & Menge sind anzugeben ⁴⁾ ist anzugeben ⁵⁾ wasserfrei	¹⁾ Klasse ist anzugeben ²⁾ bei Anlieferung ³⁾ Art & Menge sind anzugeben ⁴⁾ ist anzugeben ⁵⁾ wasserfrei	¹⁾ Lieferzustand ²⁾ Art (mineralisch/ organisch) & Anteil müssen angegeben werden ³⁾ am Werksausgang ⁴⁾ wasserfrei	¹⁾ D wahlweise, muss angegeben werden ²⁾ max. 1 % darf länger als 40 mm sein, max. Länge < 45 mm ³⁾ frisch ⁴⁾ Art & Menge müssen angegeben werden ⁵⁾ vor Abfüllung in BigBags sowie vor der Verladung loser Pellets ab Werk bzw. vor Auslieferung an Endkunden ⁶⁾ lt. EN 14961-1 bei 14961-2: 1.1, 1.2, 1.3; bei 14961-6, class A+B: 2, 3, ⁷⁾ für GZ: EN B Rohstoffinput eingegrenzt, lt. prEN 14961-1: 1.1; 1.2.1; ⁸⁾ Klasse ist anzugeben	¹⁾ Werte umgerechnet ²⁾ muss angegeben werden ³⁾ Art muss angegeben werden ⁴⁾ PFI Quality assurance/quality control (QA/QC) Program; ist nicht für den Überseetransport anwendbar													

A.3.2 Weitere Bestimmungen

Neben den o. g. Richtlinien an die Brennstoffanforderungen von Pellets existieren weitere Richtlinien, die sich beispielsweise mit der Begriffbestimmung von Pelletfeuerungsanlagen beschäftigen, die technische Anforderungen an die Fertigung von Pelletöfen und -kesseln stellen, die Prüfstandsmessungen definieren oder sich auf die Kennzeichnung der Anlagen beziehen. Viele der ursprünglich national gültigen Normen werden derzeit überarbeitet bzw. demnächst an die europäischen Anforderungen angepasst oder neu in den Verkehr gebracht. Deshalb werden in Tabelle A-5 die europäischen Normierungsaktivitäten mit Bezug zu Biomassepellets gelistet sowie deren Veröffentlichungs- und Umsetzungsstatus in nationale Normen aufgeführt.

Tabelle A-5: Pelletrelevante EN-Normen, Stand November 2011 (ohne Anspruch auf Vollständigkeit)

Europäische Regelwerke ^{a)}		Status
EN 303-5	Heating boilers - Part 5: Heating boilers for solid fuels, hand and automatically stocked, nominal heat output of up to 500 kW - Terminology, requirements, testing and marking	EN veröffentlicht August 2010
EN 12815	Residential cookers fired by solid fuel. Requirements and test methods	EN veröffentlicht März 2011
	Feuerstätten für feste Brennstoffe - Pelletöfen - Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung	DIN 18894 veröffentlicht Februar 2005
EN 14588	Solid biofuels – Terminology, definitions and descriptions	EN veröffentlicht Januar 2011
EN 14774-1	Solid biofuels – Methods for determination of moisture content – Oven dry method – Part 1: Total moisture – Reference method	EN veröffentlicht 2009 (DIN EN Februar 2010)
EN 14774-2	Solid biofuels – Methods for determination of moisture content – Oven dry method – Part 2: Total moisture – Simplified procedure	EN veröffentlicht 2009 (DIN EN April 2010)
EN 14774-3	Solid biofuels – Methods for determination of moisture content – Part 3: Moisture in general analysis sample	EN veröffentlicht 2009 (DIN EN Februar 2010)
EN 14775	Solid biofuels – Determination of ash content	EN veröffentlicht 2009 (DIN EN April 2010)
EN 14778	Solid biofuels – Sampling	EN veröffentlicht 2011 (DIN EN September 2011)
EN 14780	Solid biofuels – Sample preparation	EN veröffentlicht 2011 (DIN EN September 2011)
EN 14785	Residential space heating appliances fired by wood pellets - Requirements and test methods	EN veröffentlicht 2006 (DIN EN September 2006)
EN 14918	Solid biofuels – Methods for determination of calorific value	EN veröffentlicht 2009 (DIN EN April 2010)
EN 14961-1	Solid biofuels – Fuel specification and classes – Part 1: General requirements	EN veröffentlicht 2010 (DIN EN April 2010)
EN 14961-2	Solid biofuels – Fuel specification and classes – Part 2: Wood pellets for non-industrial use	EN veröffentlicht 2011 (DIN EN September 2011)
EN 14961-6	Solid biofuels – Fuel specification and classes – Part 6: Non-woody pellets for non-industrial use	Schlußentwurf (N1021) Juni 2011 (unveröffentlicht) FprEN Ende 2011 erwartet
EN 15103	Solid biofuels – Methods for determination of bulk density	EN veröffentlicht 2009 (DIN EN April 2010)
EN 15104	Solid biofuels - Determination of total content of carbon,	EN veröffentlicht 2011

	hydrogen and nitrogen - Instrumental methods	(DIN EN April 2011)
EN 15105	Solid biofuels – Determination of the water soluble chloride, sodium and potassium content	EN veröffentlicht 2011 (DIN EN April 2011)
EN 15148	Solid biofuels – Determination of the content of volatile matter	EN veröffentlicht 2009 (DIN EN März 2010)
EN 15149-1	Solid biofuels – Determination of particle size distribution – Part 1: Oscillation screen method using sieve apertures of 1 mm and above	EN veröffentlicht 2010 (DIN EN Januar 2011)
EN 15149-2	Solid biofuels - Determination of particle size distribution - Part 2: Vibrating screen method using sieve apertures of 3,15 mm and below	EN veröffentlicht 2010 (DIN EN Januar 2011)
TS 15149-3	Solid biofuels – Methods for the determination of particle size distribution - Part 3: Rotary screen method	TS veröffentlicht, 2006 (DIN TS April 2006) EN für Juli 2013 geplant)
EN 15150	Solid biofuels – Methods for determination of particle density	FprEN veröffentlicht 2011 (DIN EN April 2011)
EN 15210-1	Solid biofuels – Methods for determination of mechanical durability of pellets and briquettes – Part 1: Pellets	EN veröffentlicht 2009 (DIN EN April 2010)
EN 15234-1	Solid biofuels – Fuel quality assurance – Part 1: General requirements	EN veröffentlicht 2011 (DIN EN Mai 2011)
EN 15234-2	Solid biofuels – Fuel quality assurance – Part 2: Wood pellets for non-industrial use	FprEN veröffentlicht 2010, (als DIN EN Juni 2011)
EN 15234-6	Solid biofuels – Fuel quality assurance - Part 6: Non-woody pellets for non-industrial use	FprEN veröffentlicht 2011
EN 15250	Slow heat release appliances fired by solid fuel - Requirements and test methods	EN veröffentlicht 2007 (DIN EN Juni 2007)
EN 15289	Solid biofuels – Determination of total content of sulphur and chlorine	EN veröffentlicht 2011 (DIN EN April 2011)
EN 15290	Solid biofuels - Determination of major elements - Al, Ca, Fe, Mg, P, K, Si, Na and Ti	EN veröffentlicht 2011 (DIN EN April 2011)
EN 15296	Solid biofuels – Conversion of analytic results from one basis to another	EN veröffentlicht 2011 (DIN EN April 2011)
EN 15297	Solid biofuels - Determination of minor elements - As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, V and Zn	EN veröffentlicht 2011 (DIN EN April 2011)
TS 15370-1	Solid biofuels – Methods for determination of ash melting behaviour – Part1: Characteristic temperatures method	TS veröffentlicht 2006 (DIN TS Dezember 2006)
TR 15569	Solid biofuels - A guide for a quality assurance system	TR veröffentlicht 2009
EN 16126	Solid biofuels — Determination of particle size distribution of disintegrated pellets	FprEN veröffentlicht 2010 (DIN EN für 2011 erwartet)
EN 16127	Solid biofuels — Determination of length and diameter of pellets	FprEN veröffentlicht 2010 (DIN EN für 2011 erwartet)

^{a)} EN..Europäische Norm; TS..Technical Specification; TR..Technical Report; DIN..Deutsche Norm; Fpr..Vorstufe

A.4 Versuchsprogramm und technische Daten der Pelletierversuche

Die nachfolgenden Abschnitte stellen Hintergrundinformationen sowie Mess- und Analysedaten zu den Erläuterungen in Kapitel 5 dar.

A.4.1 Versuchsprogramm

Tabelle A-6 zeigt beispielhaft der Ablaufplan des Versuchsprogramms zur Pelletierung von Holzpellets mit stärkehaltigen Presshilfsmitteln unterschiedlicher Dosierung.

Tabelle A-6: Terminisierten Ablaufplans der Pelletierversuche, der 1. Versuchsreihe /255/

Charge	Stärke	Anteil	Zeitplan		Durchführung	
			Datum	Uhrzeit	Datum	Uhrzeit
1	ohne	0%	22. 05. 2006	8:00	22. 05. 2006	8:00
2	C•GEL 03401	0,5%	22. 05. 2006	9:30	22. 05. 2006	10:00
3	C•GEL 03401	1,0%	22. 05. 2006	11:00	22. 05. 2006	11:00
4	C•GEL 03401	1,5%	22. 05. 2006	12:30	22. 05. 2006	12:45
5	C•GEL 03401	2,0%	22. 05. 2006	14:00	22. 05. 2006	14:00
6	PT 20002	0,5%	22. 05. 2006	15:30	22. 05. 2006	15:30
7	PT 20002	1,0%	22. 05. 2006	17:00	22. 05. 2006	17:00
8	PT 20002	1,5%	23. 05. 2006	8:00	23. 05. 2006	8:00
9	PT 20002	2,0%	23. 05. 2006	9:30	23. 05. 2006	9:30
10	C•Gel 30002	0,5%	23. 05. 2006	11:00	23. 05. 2006	11:15
11	C•Gel 30002	1,0%	23. 05. 2006	12:30	23. 05. 2006	12:45
12	C•Gel 30002	1,5%	23. 05. 2006	14:00	23. 05. 2006	14:15
13	C•Gel 30002	2,0%	23. 05. 2006	15:30	23. 05. 2006	15:45
14	Roggen 1370	0,5%	23. 05. 2006	17:00	23. 05. 2006	17:15
15	Roggen 1370	1,0%	24. 05. 2006	8:00	24. 05. 2006	13:15
16	Roggen 1370	1,5%	24. 05. 2006	9:30	24. 05. 2006	14:45
17	Roggen 1370	2,0%	24. 05. 2006	11:00	24. 05. 2006	16:30
18	C•Plus 12015	0,5%	24. 05. 2006	12:30	07. 06. 2006	8:30
19	C•Plus 12015	1,0%	24. 05. 2006	14:00	07. 06. 2006	10:15
20	C•Plus 12015	1,5%	24. 05. 2006	15:30	07. 06. 2006	12:00
21	C•Plus 12015	2,0%	24. 05. 2006	17:00	07. 06. 2006	13:30

A.4.2 Mess- und Analysedaten

Tabelle A-7, Tabelle A-8 und Tabelle A-9 stellen Übersichten zu den brennstofftechnischen Eigenschaften (der Einsatzstoffe und der produzierten Pelletchargen) und den Prozessparametern während der Pelletiersuche mit stärkehaltigen Presshilfsmitteln unterschiedlicher Dosis dar.

Tabelle A-7: Brennstofftechnische Analyse der stärkehaltigen Presshilfsmittel, in Anlehnung an /2/

		Maisstärke C·Gel 03401	Weizenstärke PT 20002	Kartoffelstärke C·Gel 30002	Roggenmehl Roggen 1370	spezial Quellstärke ^{a)} C·Plus 12015
Wasser _{an}	[Gew.-%]	12,1	12,1	15,7	11,7	6,7
Asche _{wf}	[Gew.-%]	0,1	0,2	0,4	1,4	0,7
Brennwert, H _s _{waf}	[kJ/kg]	17661	17597	17468	18731	17747
Heizwert, H _i _{waf}	[kJ/kg]	16090	16036	15801	17145	16323
Kohlenstoff _{waf}	[Gew.-%]	50,4	50,4	50,4	52,5	50,5
Wasserstoff _{waf}	[Gew.-%]	7,1	7,1	7,6	7,2	6,5
Stickstoff _{waf}	[Gew.-%]	0,3	0,3	0,2	1,8	0,3
Schwefel _{waf}	[Gew.-%]	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,1	< 0,05
Chlor _{waf}	[Gew.-%]	u.B.	u.B.	u.B.	0,0	u.B.
Sauerstoff _{waf,add}	[Gew.-%]	42,1	42,2	41,8	38,4	42,8
Na	mg/kg	44	81	64	23	976
K	mg/kg	38	35	374	2200	117
Ca	mg/kg	161	15	198	430	100
Mg	mg/kg	<5	3	31	800	21
Fe	mg/kg	16	29	21	33	34
Si	mg/kg	386 / 437	381	710 / 962	1070	527 / 644

^{a)} thermisch modifizierte Maisstärke; u.B. Analysewert unterhalb der Bestimmungsgrenze; teilweise Mehrfachbestimmung

Tabelle A-8: Übersicht ausgewählter Brennstoffkennwerte und Prozessparameter der Versuchschargen aus den Pellettierversuchen, Teil I in Anlehnung an /2/

	Proben-Nr.	Bezugszustand	Wasser		Asche		Brennwert/Heizwert				Elementaranalyse															
			an Gew.-%	wf Gew.-%	Brennwert		Heizwert		C		H		N		S		Cl		O _{add}		Na g/kg	K g/kg	Ca g/kg	Mg g/kg	Fe g/kg	Si g/kg
					wf	waf	wf	waf	wf	waf	wf	waf	wf	waf	wf	waf	wf	waf	wf	waf						
1. Versuchsreihe	1	ohne PHM	8,8	0,54	19.901	20.009	18.475	18.575	56,6	56,9	6,54	6,57	0,33	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00	36,56	36,21	0,05	0,33	0,73	0,11	0,13	0,42
	2	0,5% Maisstärke	8,5	0,36	19.825	19.897	18.397	18.463	56,8	57,0	6,55	6,57	0,34	0,34	0,00	0,00	0,00	0,00	36,28	36,05	0,02	0,21	0,78	0,08	0,06	0,18
	3	1,0% Maisstärke	9,7	0,39	19.945	20.022	18.521	18.593	57,3	57,5	6,52	6,55	0,35	0,36	0,00	0,00	0,00	0,00	35,87	35,62	0,02	0,22	0,78	0,08	0,07	0,20
	4	1,5% Maisstärke	9,4	0,33	20.022	20.089	18.584	18.646	57,3	57,5	6,59	6,61	0,34	0,34	0,00	0,00	0,01	0,01	35,77	35,56	0,05	0,30	0,78	0,09	0,06	0,18
	5	2,0% Maisstärke	8,6	0,36	19.945	20.018	18.529	18.597	56,7	56,9	6,49	6,51	0,37	0,37	0,00	0,00	0,00	0,00	36,47	36,24	0,02	0,23	0,85	0,09	0,07	0,17
	6	0,5% Weizenstärke	9,4	0,34	20.254	20.323	18.862	18.926	57,2	57,4	6,38	6,40	0,30	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	36,15	35,93	0,01	0,19	0,73	0,07	0,05	2,26
	7	1,0% Weizenstärke	8,3	0,32	20.011	20.074	18.607	18.666	56,5	56,7	6,43	6,45	0,32	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	36,76	36,56	0,02	0,20	0,67	0,07	0,05	0,18
	8	1,5% Weizenstärke	10,0	0,31	19.967	20.029	18.502	18.560	57,0	57,2	6,71	6,73	0,34	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	35,94	35,74	0,05	0,27	0,54	0,10	0,04	0,32
	9	2,0% Weizenstärke	9,7	0,34	20.044	20.113	18.592	18.656	57,0	57,2	6,66	6,68	0,32	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	35,99	35,77	0,02	0,22	0,76	0,09	0,05	0,17
	10	0,5% Kartoffelstärke	9,8	0,34	20.100	20.169	18.653	18.717	57,2	57,4	6,63	6,65	0,38	0,38	0,00	0,00	0,00	0,00	35,79	35,57	0,05	0,27	0,63	0,10	0,04	0,36
	11	1,0% Kartoffelstärke	9,8	0,40	20.055	20.136	18.601	18.676	57,1	57,3	6,66	6,69	0,35	0,36	0,00	0,00	0,00	0,00	35,89	35,63	0,04	0,25	1,00	0,11	0,09	0,42
	12	1,5% Kartoffelstärke	9,8	0,31	19.922	19.984	18.471	18.528	57,1	57,3	6,65	6,67	0,37	0,37	0,00	0,00	0,00	0,00	35,89	35,69	0,06	0,33	0,66	0,11	0,06	0,49
	13	2,0% Kartoffelstärke	9,2	0,32	20.099	20.164	18.662	18.722	56,9	57,1	6,59	6,61	0,36	0,36	0,00	0,00	0,00	0,00	36,11	35,91	0,02	0,21	0,74	0,08	0,06	0,31
	14	0,5% Roggenmehl	8,4	0,31	19.913	19.974	18.493	18.549	57,0	57,2	6,51	6,53	0,36	0,36	0,00	0,00	0,00	0,00	36,15	35,95	0,05	0,32	0,64	0,09	0,04	0,33
	15	1,0% Roggenmehl	9,5	0,38	19.890	19.965	18.450	18.520	57,3	57,6	6,60	6,62	0,35	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	35,70	35,46	0,02	0,24	0,73	0,08	0,05	0,16
	16	1,5% Roggenmehl	8,7	0,37	20.164	20.240	18.764	18.834	57,0	57,2	6,42	6,44	0,34	0,34	0,00	0,00	0,00	0,00	36,29	36,05	0,04	0,29	0,61	0,09	0,04	0,31
	17	2,0% Roggenmehl	8,6	0,35	20.241	20.312	18.834	18.901	57,3	57,5	6,44	6,47	0,36	0,36	0,00	0,00	0,00	0,00	35,86	35,64	0,02	0,21	0,73	0,08	0,06	0,88
	18	0,5% Spezial-Quellstärke	8,8	0,39	19.792	19.870	18.399	18.472	57,2	57,5	6,38	6,41	0,35	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	36,03	35,78	0,06	0,33	0,65	0,10	0,07	0,36
	19	1,0% Spezial-Quellstärke	7,8	0,34	20.011	20.078	18.610	18.672	56,7	56,9	6,42	6,44	0,33	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00	36,53	36,32	0,02	0,21	0,74	0,08	0,07	2,44
	20	1,5% Spezial-Quellstärke	9,4	0,35	20.000	20.071	18.589	18.654	57,4	57,6	6,47	6,49	0,35	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	35,78	35,56	0,07	0,31	0,69	0,10	0,05	0,27
	21	2,0% Spezial-Quellstärke	8,7	0,33	20.120	20.187	18.715	18.777	57,3	57,5	6,44	6,46	0,35	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	35,93	35,71	0,03	0,20	0,73	0,08	0,08	0,18
2. Versuchsreihe	22	ohne Dampf	12,2	0,42	20.148	20.233	18.879	18.959	54,3	54,6	5,81	5,84	0,27	0,27	0,00	0,00	0,00	0,00	39,58	39,33	keine Analysedaten erhoben					
	23	0,5% Weizenstärke, ohne Dampf	12,3	0,48	19.840	19.936	18.583	18.672	54,2	54,4	5,76	5,79	0,29	0,29	0,00	0,00	0,00	0,00	39,79	39,50	keine Analysedaten erhoben					
	24	1,5% Weizenstärke, ohne Dampf	12,5	0,51	20.011	20.115	18.749	18.846	53,7	54,0	5,78	5,81	0,27	0,28	0,00	0,00	0,00	0,00	40,23	39,92	keine Analysedaten erhoben					
	25	0,5% Kartoffelstärke, ohne Dampf	13,6	0,55	19.842	19.952	18.581	18.685	54,1	54,4	5,78	5,81	0,30	0,31	0,00	0,00	0,00	0,00	39,80	39,47	keine Analysedaten erhoben					
	26	1,5% Kartoffelstärke, ohne Dampf	12,4	0,47	19.795	19.888	18.531	18.618	54,1	54,3	5,79	5,82	0,29	0,29	0,00	0,00	0,00	0,00	39,85	39,57	keine Analysedaten erhoben					
	27	mit Dampf	15,2	0,45	19.929	20.019	18.673	18.757	54,0	54,3	5,76	5,78	0,32	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	39,92	39,65	keine Analysedaten erhoben					
	28	0,5% Weizenstärke, mit Dampf	11,1	0,45	19.989	20.079	18.735	18.820	54,1	54,4	5,74	5,77	0,28	0,28	0,00	0,00	0,00	0,00	39,87	39,60	keine Analysedaten erhoben					
	29	1,5% Weizenstärke, mit Dampf	11,0	0,58	20.101	20.219	18.841	18.952	53,9	54,2	5,77	5,81	0,31	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	39,98	39,63	keine Analysedaten erhoben					
	30	0,5% Kartoffelstärke, mit Dampf	10,7	0,39	20.078	20.157	18.810	18.884	54,1	54,3	5,81	5,84	0,32	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00	39,77	39,54	keine Analysedaten erhoben					
	31	1,5% Kartoffelstärke, mit Dampf	10,9	0,42	19.865	19.948	18.604	18.682	54,1	54,3	5,78	5,80	0,28	0,28	0,00	0,00	0,00	0,00	39,84	39,59	keine Analysedaten erhoben					

Tabelle A-9: Übersicht ausgewählter Brennstoffkennwerte und Prozessparameter der Versuchschargen aus den Pelletierversuchen, Teil II in Anlehnung an /2/

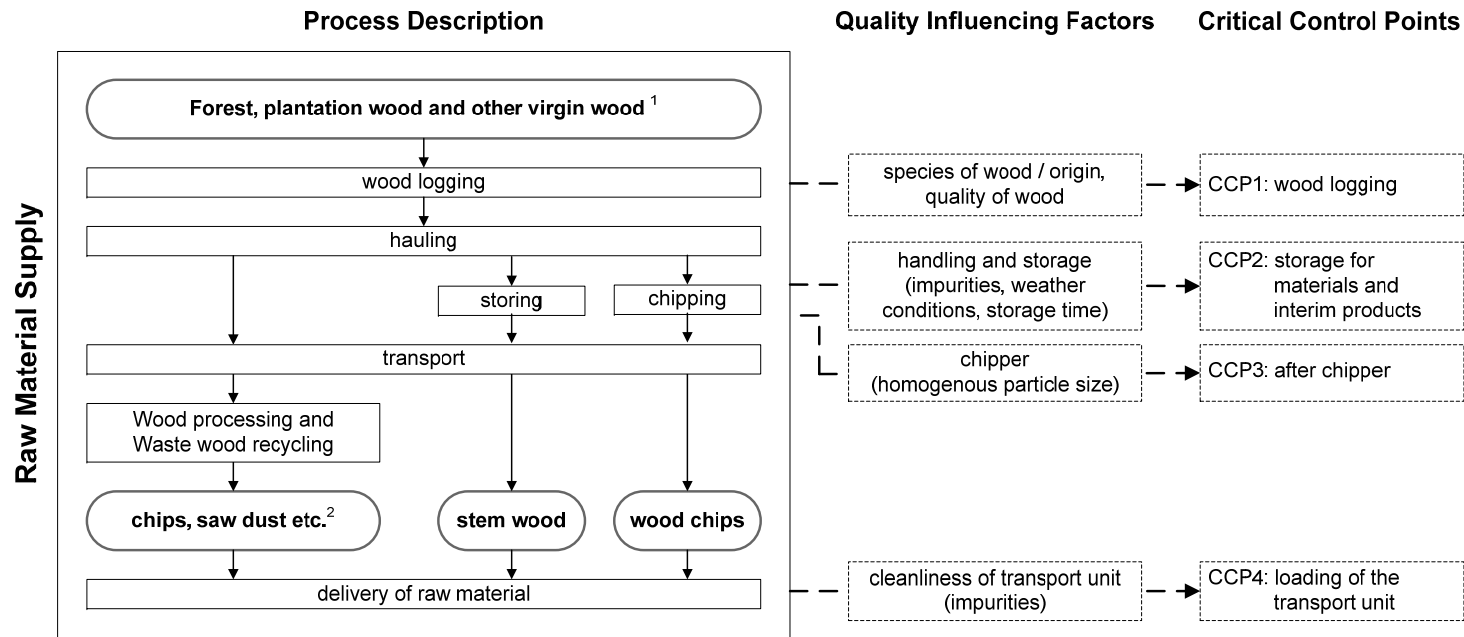
	Proben-Nr.	Bezugszustand	Aschezusammensetzung						Ascheschmelzverhalten						Pressparameter						
			Na	K	Mg	Ca	Fe	Si	Laboranalyse				T _{melt, 2008}	T _{melt, 2010}	DT _{theor.}	FT _{theor.}	Span-wasser.	Span-temp.	Press-temp.	Pellet-temp.	Abrieb
			Gew.-%	Gew.-%	Gew.-%	Gew.-%	Gew.-%	Gew.-%	DT	ST	HT	FT	°C	°C	[°C]	[°C]	%	°C	°C	°C	%
			[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
1. Versuchsreihe	1	ohne PHM	0,44	4,88	3,63	24,2	3,72	8,04	1.340	1.400	1.430	1480	1327	1313	1179	1360	11,8	27,0	61,0	30,1	6,1
	2	0,5% Maisstärke	0,34	4,99	3,87	26,9	2,67	6,29	1.330	1.610	1.630	1650	1356	1341	1186	1363	7,7	30,0	42,3	22,0	2,4
	3	1,0% Maisstärke	0,46	4,62	3,96	28,6	2,64	6,82	1.360	1.550	1.560	1590	1362	1339	1185	1362	11,3	30,0	62,4	32,2	2,1
	4	1,5% Maisstärke	0,40	5,17	3,76	27,1	2,42	5,97	1.320	1.600	1.610	1630	1359	1346	1185	1362	9,3	30,5	51,8	27,1	1,3
	5	2,0% Maisstärke	0,34	5,13	3,72	27,4	2,37	5,31	1.330	1.500	1.530	1590	1368	1354	1187	1362	11,1	29,0	62,2	33,5	1,5
	6	0,5% Weizenstärke	0,34	5,69	4,05	27,1	2,22	5,40	1.440	1.510	1.540	1570	1359	1352	1186	1363	11,3	28,0	63,2	31,8	2,7
	7	1,0% Weizenstärke	0,40	5,90	3,95	26,7	2,16	5,56	1.330	1.470	1.530	1590	1353	1350	1184	1363	11,4	30,5	62,5	32,9	1,7
	8	1,5% Weizenstärke	0,47	5,61	5,06	27,7	1,77	4,35	1.460	1.520	1.560	1600	1375	1365	1181	1361	11,1	25,0	61,5	30,2	0,9
	9	2,0% Weizenstärke	0,47	5,84	4,92	26,3	1,82	4,87	1.400	1.500	1.520	1560	1360	1355	1186	1362	11,3	26,5	60,1	28,8	0,9
	10	0,5% Kartoffelstärke	0,40	5,89	4,64	26,4	1,90	5,38	1.310	1.480	1.540	1580	1354	1350	1183	1361	9,8	27,0	k.A.	25,8	1,1
	11	1,0% Kartoffelstärke	0,37	6,30	4,23	26,9	1,98	5,63	1.260	1.460	1.570	1610	1350	1349	1188	1360	11,5	28,0	61,4	31,3	1,0
	12	1,5% Kartoffelstärke	0,41	6,23	4,81	26,1	1,84	4,67	1.340	1.490	1.530	1570	1357	1357	1182	1360	11,8	27,0	60,9	31,6	0,9
	13	2,0% Kartoffelstärke	0,36	6,15	4,42	26,6	1,78	4,60	1.280	1.480	1.540	1600	1361	1361	1185	1363	11,8	26,5	60,4	29,0	0,7
	14	0,5% Roggenmehl	0,38	6,27	4,73	27,4	1,64	4,17	1.450	1.510	1.520	1550	1368	1368	1183	1361	11,4	26,0	62,9	30,1	1,4
	15	1,0% Roggenmehl	0,39	6,28	3,82	24,8	2,21	8,18	1.300	1.420	1.470	1540	1317	1313	1185	1362	11,6	28,0	62,8	30,6	1,7
	16	1,5% Roggenmehl	0,39	6,76	3,93	23,4	2,07	7,93	1.380	1.430	1.550	1570	1308	1309	1182	1361	11,2	27,5	61,2	29,2	1,3
	17	2,0% Roggenmehl	0,37	6,12	3,76	25,2	1,91	6,10	1.400	1.580	1.600	1630	1339	1339	1185	1363	11,0	28,5	61,7	30,4	1,2
	18	0,5% Spezial-Quellstärke	0,89	5,10	3,58	24,9	2,42	8,35	1.360	1.420	1.430	1460	1326	1312	1181	1360	7,9	26,5	72,1	30,4	1,5
	19	1,0% Spezial-Quellstärke	0,61	5,23	3,56	25,5	2,30	6,74	1.350	1.560	1.580	1610	1343	1332	1184	1363	11,1	28,0	70,4	31,7	1,4
	20	1,5% Spezial-Quellstärke	0,82	5,16	3,71	26,3	2,18	6,80	1.350	1.620	1.630	1640	1347	1334	1184	1361	11,4	28,5	69,8	32,8	1,4
	21	2,0% Spezial-Quellstärke	0,95	5,26	3,66	26,8	2,14	5,86	1.420	1.580	1.600	1620	1358	1346	1184	1363	10,9	29,0	69,1	35,4	1,5
2. Versuchsreihe	22	ohne Dampf	0,48	5,01	2,86	17,80	2,64	11,20	1.200	1.230	1.240	1250	1263	1250	-	-	12,2	23,0	73,8	24,5	1,9
	23	0,5% Weizenstärke, ohne Dampf	0,49	5,00	2,75	18,70	2,58	11,40	1.200	1.260	1.270	1280	1268	1254	-	-	11,9	24,3	73,9	24,2	1,5
	24	1,5% Weizenstärke, ohne Dampf	0,55	4,92	2,74	18,50	2,73	12,10	1.200	1.240	1.250	1260	1262	1247	-	-	11,8	26,5	75,7	27,2	1,2
	25	0,5% Kartoffelstärke, ohne Dampf	0,48	6,77	3,63	21,60	2,93	11,10	1.190	1.260	1.270	1290	1275	1269	-	-	11,3	24,0	72,8	22,8	1,4
	26	1,5% Kartoffelstärke, ohne Dampf	0,69	6,70	3,75	22,60	2,86	11,60	1.160	1.210	1.320	1340	1277	1270	-	-	12,0	26,5	65,8	26,9	1,0
	27	mit Dampf	0,67	6,51	3,88	22,60	3,16	11,70	1.170	1.260	1.270	1300	1278	1270	-	-	12,7	47,5	77,3	21,7	1,4
	28	0,5% Weizenstärke, mit Dampf	0,73	7,54	3,87	22,60	2,71	10,60	1.250	1.390	1.410	1450	1278	1276	-	-	10,5	44,0	51,2	26,1	1,2
	29	1,5% Weizenstärke, mit Dampf	0,54	7,30	3,83	22,30	3,14	11,20	1.220	1.320	1.340	1370	1274	1270	-	-	10,4	46,0	50,8	26,4	0,9
	30	0,5% Kartoffelstärke, mit Dampf	0,56	7,15	3,96	22,80	2,62	10,70	1.240	1.300	1.320	1340	1281	1278	-	-	10,6	45,5	53,9	27,3	1,1
	31	1,5% Kartoffelstärke, mit Dampf	0,59	7,81	4,07	24,10	2,25	9,68	1.240	1.300	1.320	1340	1290	1292	-	-	10,3	46,0	53,6	31,6	0,6

DT Erweichungs-, ST Sphärisch-, HT Halbkugel- und FT Fließtemperatur nach DIN 51730

T_{melt} kalkulatorische Ascheschmelztemperatur, DT_{theor.} / FT_{theor.} kalkulatorisch ermittelte Ascheerweichungs- und -fließtemperatur

A.5 Leitfaden zur Qualitätssicherung der Holzpelletbereitstellung

Nachfolgend sind Auszüge aus dem Entwurf zur Umsetzung der EN 15234-1 aufgeführt, anhand derer ein Unternehmen individuelle Qualitätssicherungsmaßnahmen für die Rohmaterialbereitstellung zur Holzpelletproduktion sowie während der Brennstoffproduktion und -bereitstellung umsetzen kann. Die vollständige Prozedur umfasst 6 Stufen (Steps), wovon in Abb. A-0-1 und Abb. A-0-2 nur die Steps 2 bis 4 dargestellt sind; Step 1: Definition der Brennstoffanforderungen an das Endprodukt, Step 2: Dokumentation der Prozesskettenbeschreibung, Step 3: Identifikation der Einflussfaktoren auf die Endprodukt-spezifischen Eigenschaften, Step 4: Definition von Steuerungspunkten zur Beeinflussung der Brennstoffeigenschaften, Step 5: Maßnahmen zur Sicherung der Brennstoffqualität, Step 6: Maßnahmen zur Ausschleusung und Umgang mit nicht-normkonformen Material.



¹ according to EN 14961-1, table 1, class 1.1

² according to EN 14961-1, table 1, class 1.2 or 1.3

Abb. A-0-1: Möglichkeiten der Prozesskettenbeschreibung zur Rohmaterialbereitstellung für die Holzpelletherstellung einschließlich ihrer Faktoren zur Beeinflussung und Steuerung (Critical Control Points, CCPs) der brennstoffspezifischen Eigenschaften, Vorarbeiten für EN 15234-2 (N254)

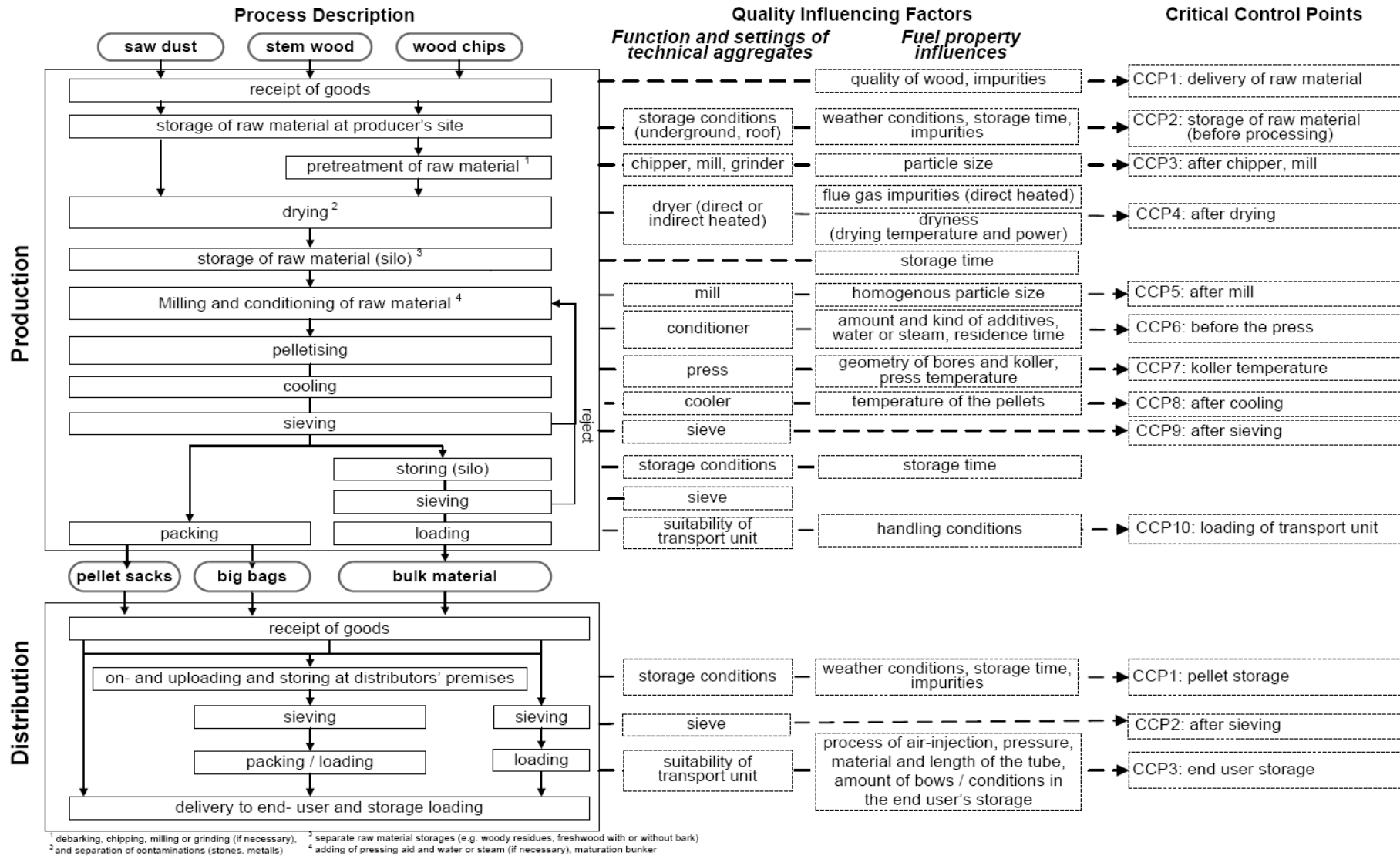
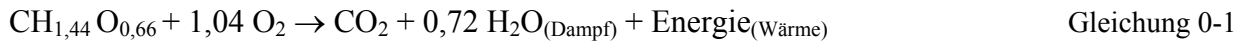


Abb. A-0-2: Möglichkeiten der Prozesskettenbeschreibung zur Holzpelletproduktion und -distribution einschließlich ihrer Faktoren zur Beeinflussung und Steuerung (Critical Control Points, CCPs) der brennstoffspezifischen Eigenschaften, Vorarbeiten für EN 15234-2 (N254) /191/

A.6 Thermochemische Konversion – Ablauf

Die Wärmebereitstellung mit Holzpellets erfolgt typischer Weise als Verbrennungsreaktion.

Als Verbrennung wird die vollständige Oxidation eines Brennstoffs unter Energiefreisetzung verstanden. Kohlenstoff (C) bzw. Wasserstoff (H) werden in Gegenwart von Sauerstoff (O) letztlich zu Kohlenstoffdioxid (CO₂) bzw. Wasser (H₂O) oxidiert. Die Oxidation von Holz lässt sich durch folgende Reaktionsgleichung beschreiben /103/, /145/:



Bei der vollständigen Oxidation aller oxidierbaren Bestandteile muss die Luftüberschusszahl λ immer gleich oder größer eins sein ($\lambda \geq 1$). Bei einer unvollständigen Verbrennung (d. h. bei $\lambda < 1$) verbleiben nach Ablauf der Oxidationsreaktion noch un- oder teiloxidierte Brennstoffmengen, die anschließend unter Energiefreisetzung weiter oxidiert werden können. Voraussetzungen für eine vollständige Verbrennung ist eine hohe Verbrennungstemperatur, eine gute Vermischung der brennbaren Gase mit der Verbrennungsluft, ein kleiner Luftüberschuss und eine ausreichende Aufenthaltszeit der Brennstoffteilchen in der heißen Verbrennungszone.

Die vollständige Verbrennung von Holz kann in mehrere Phasen gegliedert werden, die z. T. gleichzeitig, z. T. nacheinander ablaufen und u. a. in /103/, /148/, /232/ ausführlich beschrieben sowie in Abb. A-0-3 schematisch dargestellt sind.

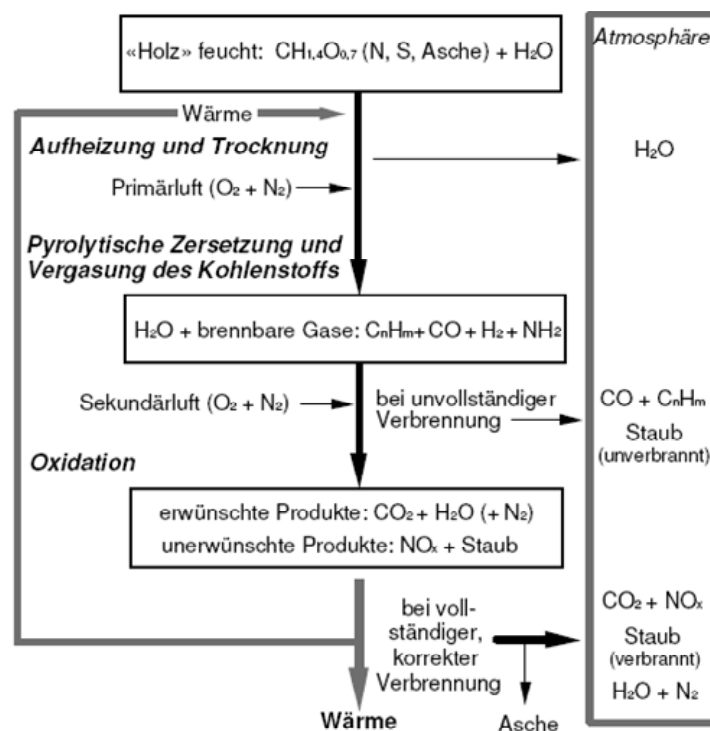


Abb. A-0-3: Abbrandverhalten von Holz über Trocknung, Vergasung mit Primärluft und Oxidation der Gase mit Sekundärluft (nicht dargestellt ist der parallel zum Gasausbrand ablaufende Abbrand des Kohlenstoffs mit Primärluft) /60/

- **Aufheizung und Trocknung.** Mit dem Eintritt der Biomasse in den Feuerraum beginnt die Erwärmung des Brennstoffs durch Rückstrahlung von Flamme, Glutbett und Feuerraumwänden. Im Zuge dessen findet die Trocknung des Brennstoffs durch Verdampfung und Wegtransport des Wassers statt. Dabei wird sowohl das ungebundene Wasser aus der porösen Struktur des organischen Materials als auch das gebundene Wasser aus dem Inneren der Zellen (Temperaturen $>100^\circ\text{C}$) ausgetrieben.
- **Pyrolytische Zersetzung.** Ab einer Temperatur von etwa 200°C beginnt die pyrolytische Zersetzung mit der Aufspaltung der Makromoleküle (d. h. Cellulose, Hemizellulose, Lig-

nin). Dabei werden die flüchtigen Bestandteile (CO , CH_4 , $\text{H}_2\text{O}_{\text{Dampf}}$ etc.), Teere und organischen Dämpfe / Aromate freigesetzt. Zurück bleibt fester Kohlenstoff (Holzkohle).

- **Vergasung.** Bei etwa 500°C beginnt die Vergasung des festen Kohlenstoffs (etwa 15 – 20 % der Biomasse) mit Kohlenstoffdioxid, Wasserdampf und Sauerstoff zu Kohlenstoffmonoxid.
- **Oxidation.** Die flüchtigen Verbindungen, d. h. die gasförmigen Produkte der pyrolytischen Zersetzung (etwa 80 – 85 %), vermischen sich mit dem zugeführten Sauerstoff und eine homogene Gasphasenoxidation setzt ein. Die Oxidation der Holzkohle beginnt bei etwa 700°C mit einer heterogenen Gas-Feststoff-Reaktion, weshalb diese Phase bedeutend langsamer als die Verbrennung der Gase im Feuerraum abläuft. Je nach Brennstoff und Feuerungssystem steigen die Temperaturen in Holzfeuerungsanlagen während der 2-stufigen Verbrennung auf bis zu $1\,500^\circ\text{C}$ (max. $2\,000^\circ\text{C}$, typischer Weise jedoch zwischen 900 – $1\,300^\circ\text{C}$) in der Hauptreaktionszone und liegen bei 600 – 700°C am Ende der Brennkammer.

Die oben geschilderten Verbrennungsvorgänge laufen u. a. in Abhängigkeit von den lokalen Temperaturen in den verschiedenen Bereichen des Brennstoffs gleichzeitig ab (z. B. an der Holzpelletoberfläche und im Pelletkern). Die Reaktionsgeschwindigkeit wird dabei auch von der Größe der Brennstoffteilchen und von der Temperatur in der Feuerung bestimmt. Bei automatisch beschickten, kontinuierlich betriebenen Feuerungen finden zu jedem Zeitpunkt die beschriebenen Vorgänge parallel statt, da sowohl kontinuierlich neuer Brennstoff im Feuerraum zugeführt wird, als auch bereits Holzkohle vorhanden ist und verbrennt /103/, /145/, /151/, /232/, /245/, /266/.

A.7 Rahmenbedingungen zum Betrieb von Holzpellet-KFA in Deutschland

Beim Betrieb einer Feuerungsanlage mit Holzpellets sollte nicht nur der Brennstoff speziellen Anforderungen entsprechen (Kapitel 2.1). Aus Sicht des Gesetzgebers gilt es vor allem den Anforderungen an die Luftreinhaltung gerecht zu werden, als auch anerkannte technische Standards und Richtlinien zu beachten, die beispielsweise zur Nachweisführung der Energieeffizienz einer Anlage oder der Nachhaltigkeit des Brennstoffeinsatzes zur Wärmebereitstellung herangezogen werden können (Kapitel A.7.1). Weiterhin ist zu klären, wie und wo die anfallenden Rückstände aus der Verbrennung verwertet oder entsorgt werden können (Kapitel A.7.2).

A.7.1 Anforderungen an die Luftreinhaltung

A.7.1.1 Gesetzliche Vorgaben

Bundesimmissionsschutzverordnung (BImSchV). In Deutschland kommt für den Einsatz von Holzpellets die 1. BImSchV zur Anwendung. In Tabelle A-10 sind die geltenden Grenzwerte für Holzpelletfeuerungsanlagen bis 1 MW_{NWL} im Vergleich zum Anlagenbetrieb mit naturbelassenem Holz oder mit Strohpellets dargestellt.

Tabelle A-10: Gesetzliche Emissionsgrenzwerte für die Verbrennung von Holzpellets im Vergleich zu anderen biogenen Festbrennstoffen in Feuerungsanlagen bis 1 MW /18/, /19/, /234/

Brennstoff	Grenzwerte gemäß 1. BImSchV (Sept. 2002) bzw. TA-Luft (Juli 2002) ^{a)}					Grenzwerte der Novellierung 1. BImSchV (gültig seit März 2010) ^{a)}				
	NWL	Staub	CO	NO _x	Dioxine/ Furane	NWL	Staub	CO	NO _x ^{e)}	Dioxine/ Furane
	kW					mg/m ³ _N				
naturbelassenes Holz	≥15 - 50	150	4.000	-	-	≥4 - 500	100 ^{e)} / 20 ^{d)}	1000 ^{e)} / 400 ^{d)}	-	-
	>50 - 150		2.000			500 ^{e)} / 400 ^{d)}				
	>150 - 500		1.000							
	>500 - 1.000		500							
Holzpellets	≥15 - 50	150	4.000	-	-	≥4 - 500	60 ^{e)} / 20 ^{d)}	800 ^{e)} / 400 ^{d)}	-	-
	>50 - 150		2.000							
	>150 - 500		1.000							
	>500 - 1.000		500							
Stroh, Getreide (Körner, Pellets, Ganzpflanzen) ^{b)}	≥ 15 - 100	150	4.000	-	-	≥4 - <100	100 ^{e)} / 20 ^{d)}	1000 ^{e)} / 400 ^{d)} / 250 ^{e,d)}	600 ^{e)} / 500 ^{d)}	0,1 ^{e)}
	>100 - 1.000 ^{d)}	40	200	400						

^{a)} alle Grenzwerte beziehen sich auf 13 % Bezugssauerstoff

^{b)} (Pellets aus) Stroh und ähnlichen pflanzl. Stoffe, nicht als Lebensmittel bestimmtes Getreide (Körner, Ganzpflanzen, Ausputz, Spelzen und Halmresten); zulässig nur in autom.beschickten Feuerungsanlagen bis 100 kW NWL; Einsatz bis 48 Monate nach Verkündung der novell. 1. BImSchV nur in Betrieben der Land- und Forstwirtschaft, des Gartenbaus und im agrargewerblichen Sektor, die Erfahrung im Umgang mit Getreide haben; Anlagen ab 100 kW FWL unterliegen TA-Luft (Umrechnung Bezugssauerstoff 11 % auf 13 % anhand Faktor 1,25)

^{c)} für Neuanlagen (außer Einzelraumfeuerungsanlagen) bzw. für Bestandsanlagen je nach Zeitpunkt der Errichtung:

- bis einschließlich 31. Dezember 1994: ab 1. Januar 2015

- vom 1. Januar 1995 bis einschließlich 31. Dezember 2004: ab 1. Januar 2019

- vom 1. Januar 2005 bis einschließlich 01. Juli 2009: ab 1. Januar 2025

^{d)} für Anlagen, die nach dem 31.12.2014 errichtet werden

^{e)} Nachweis bei stroh- oder halmgutartigen Brennstoffen durch Hersteller im Rahmen der Typenprüfung (einmalig)

^{f)} zusätzl. Grenzwert für flüchtige organ.Kohlenstoffverbindungen (Gesamt-C): 40 mg/Nm³ (bzw. 50 mg/Nm³ bei 11% Bezugssauerstoff)

Bis Ende 2009 galten für den Einsatz von naturbelassenem Holz einheitliche Emissionsgrenzwerte je Leistungsklasse, unabhängig von der Brennstoffform. Mit dem Inkrafttreten der Novellierung der 1. BImSchV in 2010 erfolgte eine

- Absenkung der kleinsten Leistungsklasse von 15 auf 4 kW_{NWL},
- sukzessive Verschärfung der Staub- und CO-Grenzwerte,
- Fixierung zusätzlicher Grenzwerte für NO_x und Dioxin-Emissionen für Stroh und strohähnliche Brennstoffe.

Mittelfristig werden damit die Anforderungen an die Brennstoffeigenschaften bzw. die Feuerungstechnologie weiter steigen, um die gesetzlichen Anforderungen der novellierten BImSchV

auch nach dem Jahr 2014 noch erfüllen zu können.

A.7.1.2 Gütezeichen, Richtlinien, und Normen

Umweltzeichen „Blauer Engel“. Besonders emissionsarme und energieeffiziente Pelletfeuerungen werden vom Deutschen Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e.V. (RAL) mit dem Umweltzeichen „Blauer Engel“ ausgezeichnet. Das RAL-Umweltzeichen 111 für Pelletöfen und das RAL-Umweltzeichen 112 für Pelletkessel zeichnet besonders effiziente Hersteller aus, die über die gesetzlichen Anforderungen hinausgehen. Mit dem Jahr 2012 wurden die Kriterien für die Auszeichnung einer Feuerungsanlage mit dem „Blauen Engel“ erhöht (Tabelle A-11).

Tabelle A-11: Anforderungen an Holzpelletfeuerungsanlagen des Umweltzeichens „Blauer Engel“ /194/, /195/, /196/, /197/

Gültigkeit	Produkt	NWL kW	Rationelle Energienutzung				Emissionen ^{e)}						
			Wirkungsgrad		Hilfstrombedarf % bez. auf Nennlast		Staub mg/m ³ _N		CO mg/m ³ _N		NO _x mg/m ³ _N	C _{gesamt} mg/m ³ _N	
			Nennlast	Teillast	Nennlast	Teillast	Nennlast	Teillast	Nennlast	Teillast	Nennlast	Nennlast	Teillast
bis 31.12.2011 ^{f)}	Pelletöfen ^{a)} (RAL-UZ 111)	≤ 15 ^{b)}	≥ 90%	≥ 90%	≤ 1% ^{d)}	–	≤ 25	-	≤ 180	≤ 400	≤ 150	≤ 10	≤ 15
	Pelletkessel ^{a)} (RAL-UZ 112)	≤ 50 ^{c)}	≥ 90%	≥ 88%	≤ 1% ^{d)}	–	≤ 20	-	≤ 90	≤ 200	≤ 150	≤ 5	≤ 5
ab 01.01.2012 ^{f)}	Pelletöfen ^{g)} (RAL-UZ 111) ^{h)}	≤ 50 > 50	≥ 90%	≥ 90%	≤ 0,8% (0,9)	≤ 0,4% (0,7)	≤ 25 (20)	≤ 55 (45)	≤ 160	≤ 350	≤ 150	≤ 8	≤ 13
	Pelletkessel ^{g)} (RAL-UZ 112)	≤ 50 > 50	≥ 90% ⁱ⁾	≥ 89% ⁱ⁾	≤ 80 W oder 0,8%	≤ 80 W oder 0,6%	≤ 20	≤ 40	≤ 80 ≤ 70	≤ 180 ≤ 150	≤ 150	≤ 5	≤ 5

a) ausschließlicher Einsatz von Holzpellets, vorzugsweise gemäß DINplus oder nach ÖNORM M 7135 bzw. DIN 51731

b) mit automatischer Zündung und Verbrennungsregelung

c) mit automatischer Zündung, Wärmetauscherreinigung sowie Leistungs- und Verbrennungsregelung

d) der erzeugten thermischen Leistung

e) bezogen auf Abgas im Normzustand (0°C, 1013 mbar) mit einem Volumengehalt an Sauerstoff von 13%

f) sonstige Anforderungen an: Hilfstrombedarf bei Teillast- und Stand-by-Betrieb, elektrische Leistungsaufnahme wichtiger Anlagenteile, wasserseitiger Widerstand, Einstell- und Bedienungsanleitung, Angebot von Dienstleistungen

g) ausschließlicher Einsatz von DINplus (2010), ENplus (A1) oder anderweitige Holzpellets nach DIN EN 14961-2

h) Klammerwerte gelten für wassergeführte Öfen

i) die Leistung für Wirkungsgradbegrenzungen wurde abweichend von der 50 kW-Grenze bei Pelletkesseln ab 2012 auf ≤12 kW bzw. >12 kW

Luftqualitätsrichtlinie. Ziel der seit Juni 2008 gültigen „Richtlinie über Luftqualität und saubere Luft für Europa“ ist die weitgehende Reduktion von gesundheits- und umweltschädlichen Wirkungen durch Emissionen diverser Schadstoffe (z. B. SO₂, NO, NO₂, CO, Benzol, Partikel (Feinstäube PM₁₀/PM_{2,5}), Blei, Ozon). Dabei werden Grenz- und Zielwerte für verschiedene Schadstoffe in der Luft festgelegt und einheitliche Prüf- und Messmethoden sowie Alarm- und Informationswerte definiert, um eine rechtzeitige und ausreichende Information der Öffentlichkeit zu gewährleisten. Erstmals werden auch Grenzwerte für die lungengängigen PM_{2,5}-Partikel aufgeführt, deren Konzentration bis zum Jahr 2020 gegenüber den Werten aus 2010 um 20 % gesenkt werden sollen. Die Betrachtung der Schadstoffemissionen erfolgt flächenbezogen und unabhängig vom Verursacherprinzip /16/, /205/.

Diese Grenzwerte sind vor allem für die Hersteller von Pelletfeuerungs- bzw. Filter- und Abscheideranlagen zu beachten, da die Verbrennung von Holzpellets zu einer Erhöhung der Feinstaubkonzentration in der Luft beiträgt (Kapitel 3.4).

Die Luftqualitätsrichtlinie wurde 2010 durch eine entsprechende Anpassung des Bundesimmissionsschutzgesetzes (BImSchG) sowie durch eine neue Rechtsverordnung in deutsches Recht umgesetzt werden. Für die Überwachung der Grenzwerte sind die Bundesländer zuständig /17/.

Ökodesign-Richtlinie. Die EU-Richtlinie 2005/32/EG limitiert die Umweltwirkungen, die durch die Herstellung, den Gebrauch und die Entsorgung eines Produktes verursacht werden. Mit der Ökodesign-Richtlinie (Ökodesign-RL) wird die Grundlage für die Bewertung und umweltgerechte Gestaltung energiebetriebener Produkte gelegt, die in Deutschland mit der „Energiebetrie-

bene-Produkte-Richtlinie“ (EBPG) in nationales Recht umgesetzt wurde. Auf deren Basis werden Durchführungsmaßnahmen u. a. für eine Verordnung für Festbrennstoff-KFA erarbeitet /203/, /204/. Betrachtet werden

- Einzelraumfeuerungen zum Heizen und Kochen in privaten Haushalten bis 50 kW sowie
- Zentralheizungskessel, unterteilt in zwei Leistungsklassen bis 50 kW und bis 500 kW.

Den Heizanlagen vor- oder nachgelagerte Komponenten wie z. B. Brennstoffzuführung, Regelung oder Pufferspeicher werden nicht einbezogen. Die verfügbaren KFA werden ausschließlich hinsichtlich ihrer technischen Eigenschaften und Innovationspotenziale, deren Beeinflussung durch das Verbraucherverhalten und der Marktsituation geprüft und bewertet. Die Einbeziehung von Energieeffizienz- Emissionsanforderungen an KFA (z. B. NO_x) wird diskutiert. Die Ökodesign-RL wird aber immer nur neben den nationalen Emissionsrichtlinien (Tabelle A-10) angewandt werden, da sie sich ausschließlich auf das Inverkehrbringen von Neuanlagen (Prüfstandsuntersuchungen) bezieht, nicht auf deren Betrieb. Sie enthält keine Regelungen zu Emissionsgrenzwerten oder den zulässigen Brennstoffen während des Anlagenbetriebes /9/, /26/.

A.7.2 Anforderungen an die Ascheverwertung und -entsorgung

Während der Bereich der Anlagengenehmigung und Luftreinhalte bereits umfassend auf nationaler und EU-Ebene geregelt ist, existieren für die Ascheentsorgung /-verwertung aus Holzpelletfeuerungen bisher keine konsistenten Normen.

Holzaschen sind Abfälle im Sinne des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes (KrW-/AbfG), da der Hauptzweck des Betriebes der Verbrennungsanlage auf die Erzeugung von Energie und nicht auf die Produktion von Asche gerichtet ist /122/. Nach den Grundsätzen der Kreislaufwirtschaft hat die Verwertung von Abfällen Vorrang vor deren Beseitigung, sofern die Beseitigung nicht die umweltverträglichere Lösung darstellt /133/. Deshalb liegt eine Rückführung von Holzasche auf land- und forstwirtschaftliche Flächen nahe, um den durch Biomasseentzug entstandenen Nährstoffbedarf teilweise wieder auszugleichen. Der Nutzen resultiert aus dem Düngewert der Asche, der maßgeblich von den Gehalten an P, Ca, Mg und K bestimmt wird und je nach Art und Herkunft der Biomasse sowie ihrer thermischen Umsetzung stark variiert (Kapitel 2.2.2).

Bei Aschen aus Festbrennstoffverbrennungsanlagen wird entsprechend ihrem Anfallort nach Grob- und Rostasche, Zyklonasche (Fein- und Flugasche) und Filterasche (Feinstasche) differenziert, deren Verwertung sich v. a. entsprechend der Schwermetallbelastung und dem Nährstoffgehalt unterscheidet. Die Aschen müssen deshalb im Labor analysiert, klassifiziert und entsprechend der Düngemittelverordnung (DüMV) einem zugelassenen Düngemitteltyp zugeordnet werden. Die DüMV setzt die Vorgaben des 2009 in Kraft getretenen Düngegesetzes (DüngG) hinsichtlich des Inverkehrbringens und der Kennzeichnung von Düngemittel um. Die Düngung muss „nach Art, Menge und Zeit auf den Bedarf der Pflanzen und des Bodens unter Berücksichtigung der im Boden verfügbaren Nährstoffe und organischen Substanz sowie der Standort- und Anbaubedingungen“ ausgerichtet sein /46/, /47/. Prinzipiell dürfen aus der Verbrennung von naturbelassenem Holz ausschließlich „unbelastete“ Aschen aus dem Brennraum (Rostasche)³⁷ eingesetzt werden /133/. Die Verwendung von Zyklonasche ist nur zulässig, wenn sie aus einem Abscheider stammt, dem ein Elektro- oder Gewebefilter nachgeschaltet ist. Je nach Deklaration und bei Einhaltung der entsprechenden Grenzwerte und Mindestnährstoffgehalte kann die Asche in Reinform als Kalk- oder Kaliumdünger verwendet werden. Eine andere Möglichkeit ist theoretisch die Nutzung als Zuschlagsstoff für den Düngemitteltyp „kohlenaurer Kalk“, in mineralischen Mehrstoffdüngern oder in organisch-mineralischen Düngemitteln /133/. Da in Deutschland

³⁷ Bei der ausschließlichen Verbrennung von unbehandelten Hölzern in Energieerzeugungsanlagen wird entsprechend der Abfallverzeichnisverordnung (AVV) die anfallende Asche der Kennzeichnungsgruppe 10 01 01 „Rost- und Kesselasche“ zugeordnet, da davon ausgegangen wird, dass während der Verbrennung keine Rostasche anfällt, die gefährliche Substanzen enthält /218/.

die meisten forstwirtschaftlich bewirtschafteten Flächen einer Nachhaltigkeitszertifizierung unterliegen (Kapitel 2.1.3), ist eine Ertragsdüngung auf diesen Flächen praktisch nicht möglich. Lediglich die Bodenschutzkalkung zur Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit ist bis zu einer Zugabemenge von 30 % möglich /218/. Die Waldgesetze der einzelnen Bundesländer präzisieren die Fälle, bei denen die Ausbringung von Holzasche außerhalb der Waldkalkung zulässig ist /118/.

In der Praxis wird die Asche aus privaten Holzfeuerungsanlagen üblicher Weise über den Hausmüll entsorgt (Aschetonne). Bei einer privaten Verwertung von Holzaschen aus Kleinfeuerungsanlagen im Garten ist das Bodenschutzrecht anzuwenden (BBodSchG, BBodSchV). Dabei gilt, dass für Materialien – die auf Böden aufgebracht werden – eine jährliche Zusatzbelastung der Böden durch Schwermetalle nicht überschritten werden darf. Die maximale jährlich zulässige Aufbringungsmenge für Grob-/Rostasche aus der Verbrennung naturbelassener Holzhackschnitzel wird dabei auf etwa 40 g/m² und für Holzpelletaschen auf 20 g/m² abgeschätzt. Durch natürliche Bodenbelastungen und Immissionen (z. B. aus der Luft) werden die Aufbringungsmengen zusätzlich reduziert. Eine Ausbringung der Aschen im Garten ist daher nicht oder nur sehr eingeschränkt ratsam /227/.

Die Zumischung von Holzaschen in Kompostieranlagen ist entsprechend den Vorgaben der Bioabfallverordnung (BioAbfV) möglich. Für größere Aschemengen, die nicht zur Bodenschutzkalkung ausgebracht oder Düngemitteln bzw. Kompost zugemischt werden können, sind andere Entsorgungswege zu suchen. Gegebenenfalls können auch „schwach belastete“ Aschen noch als Bauzuschlagstoff Verwendung finden (z. B. in der Zementindustrie), oder sie müssen so beseitigt werden, dass das Wohl der Allgemeinheit nicht beeinträchtigt wird. Die Möglichkeit zur Ablagerung auf einer Deponie bemisst sich dabei nach der Auslaugfähigkeit der einzelnen Schadstoffe. Üblicherweise dürfen Feuerraumaschen obertägig deponiert werden, während „stark belastete Aschen“ (z. B. Filterstäube) wegen hoher TOC- und Eluatbelastungen unterirdisch abgelagert werden müssen. Der gesamte Bereich des Deponierechtes wurde im Jahr 2009 unter Beachtung der europäischen Vorgaben novelliert und in der „Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechtes“ umgesetzt. Für die Entsorgung von Holzaschen ist dabei in aller Regel die Deponieklasse II (DK II) relevant /218/, /258/, /260/.

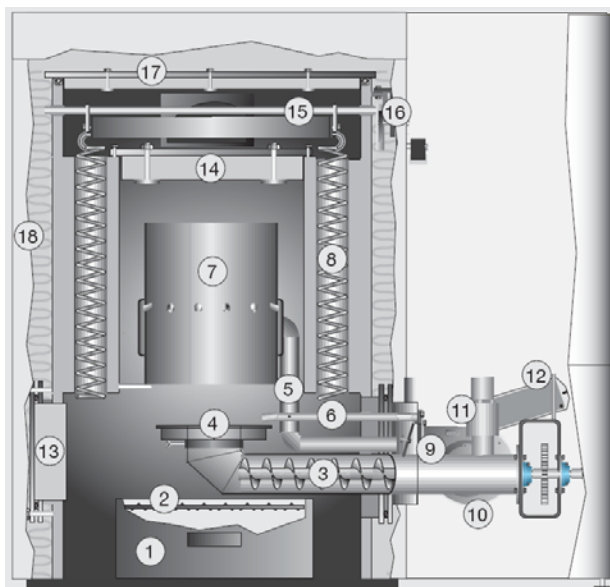
A.8 Funktionsweise von Pelletfeuerungsanlagen

In Tabelle A-12 werden beispielhaft die technischen Daten von zwei marktgängigen Pelletfeuerungsanlagenmodellen in Deutschland – beispielsweise zur Versorgung eines Einfamilienhauses – vorgestellt und deren Funktionsprinzip beschrieben.

Tabelle A-12: Ausgewählte technische Daten von zwei Pellet-KFA /172/, /174/, /248/, /249/

Parameter	Paradigma, Pelletti SR 203	Viessmann, Vitolog VL3A
Nennleistung	20 kW	15 kW
Teillast	6 kW	5 kW
Kesselwasserinhalt	68 l	59 l
Brennstofffüllraum	62 l	232 l
zulässiger Betriebstemperaturbereich	60 – 90°C	60 – 95°C
maximale Feuerraumtemperatur	900 – 1 100 °C	keine Angaben
Abgastemperatur bei Nennleistung	160°C	136°C
Abgastemperatur bei Teillast	100°C	82°C
Abgasmassenstrom bei Nennleistung	33 kg/h (44 kg/h)	33,1 kg/h
Abgasmassenstrom bei Teillast	11,3 kg/h (15 kg/h)	12,4 kg/h
CO ₂ -Gehalt im Abgas bei Nennlast	12,9 % (12,7 %)	12 %
CO ₂ -Gehalt im Abgas bei Teillast	6,7 % (7,5 %)	keine Angaben
Aschebehälter	25 l	36 l

Paradigma Pelletti II SR 203. Der Pelletti ist mit einer Unterschubfeuerung ausgestattet. Für die Leistungsmodulation wird die Brennstoffzufuhr über die Förderschnecke (mit Rückbrandsicherung) in Abhängigkeit von der Brennraum- und Abgastemperatur sowie von der Wärmeabnahme variiert. Die Luftzufuhr wird von der Regelung an die Brennstoffmenge angepasst. Der untere Teil der in der nachfolgenden Abb. zeigt den Kesselinnenraum mit dem Brennteller, der Zündeinrichtung sowie der Primär- und Sekundärluftzufuhr. Im Betrieb anfallende Asche wird zunächst auf dem Brennteller (Brennerretorte) gesammelt, um anschließend von dem nachschiebenden Brennstoff über den Brenntellerrand in den Aschesammelbehälter geschoben zu werden. Das freigesetzte Brenngas der Pellets strömt nach oben in die Brennkammer und wird unter Zugabe der Sekundärluft vollständig oxidiert /129/, /173/.



- 1) Aschenlade
- 2) Automatische Aschenkomprimierung
- 3) Pelleteinschubschnecke
- 4) Brennerretorte
- 5) Sekundärluftzufuhr
- 6) Heizpatrone zur Zündung
- 7) Flammrohr
- 8) Reinigungsfedern
- 9) Rückschlagklappe
- 10) Brennergebläse
- 11) Brandschutzklappe
- 12) Stellmotor der Brandschutzklappe
- 13) Wechselflansch Brenner
- 14) Innere Flammrohrabdeckung
- 15) Reinigungsmechanik
- 16) Reinigungsmotor
- 17) Äußere Kesselabdeckung
- 18) Wärmedämmung

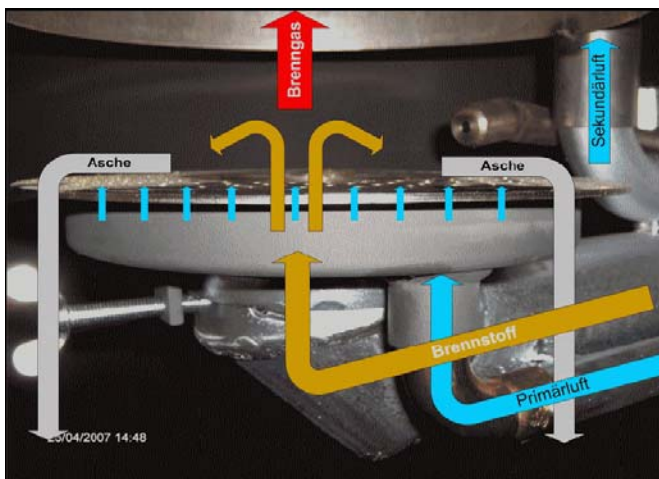
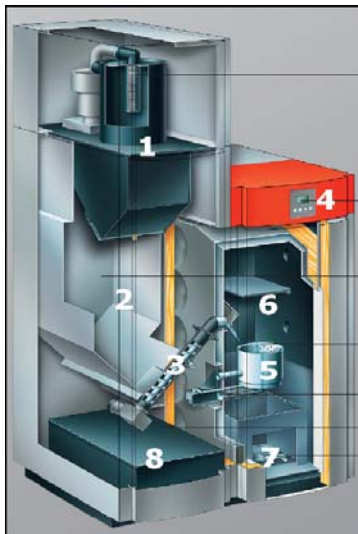


Abb. A-0-4: Funktionsskizze des Pelletti II SR 203 (oberes Bild), Prinzip der Brennstoff- und Luftzufuhr sowie der Ascheabführung im Feuerraum (unteres Bild links), Brennerretorte mit Pellets (Bild unten rechts) /2/, /172/

Vitolig 300 VL3A. Der VL3A ist mit einer Fallschachtfeuerung ausgerüstet, bei der die Pellets über eine Förderschnecke aus dem Vorratsbehälter von oben in die Brennkammer transportiert werden und dabei in einen Brennertopf fallen. Dort findet unter Zugabe von Primär- und Sekundärluft die Verbrennung statt. Der Unterdruck des Saugzuggebläses sorgt dafür, dass die Verbrennungsluft über Öffnungen in der Brennertopfkonstruktion zum Brennstoff gelangt. Der bewegliche Boden des Brennertopfes ist mit fächerförmig angeordneten Zwischenräumen verse-

hen. Diese werden im Betrieb über eine Regelungsmechanik automatisch geöffnet, um die angefallene Asche zu entfernen. Die Asche fällt zunächst nach unten in die Aschelade und wird anschließend mit einer weite ren Förderschnecke in den Aschesammelbehälter (unterhalb des Brennstoffvorratbehälters) transportiert /2/.



- 1) Pelletzuführung
- 2) Pelletvorratsbehälter
- 3) Förderschnecke
- 4) Bedienfeld / Regelung
- 5) Brenntopf
- 6) Feuerraum
- 7) Ascheaustragsystem mit Förderschnecke
- 8) Aschesammelbehälter

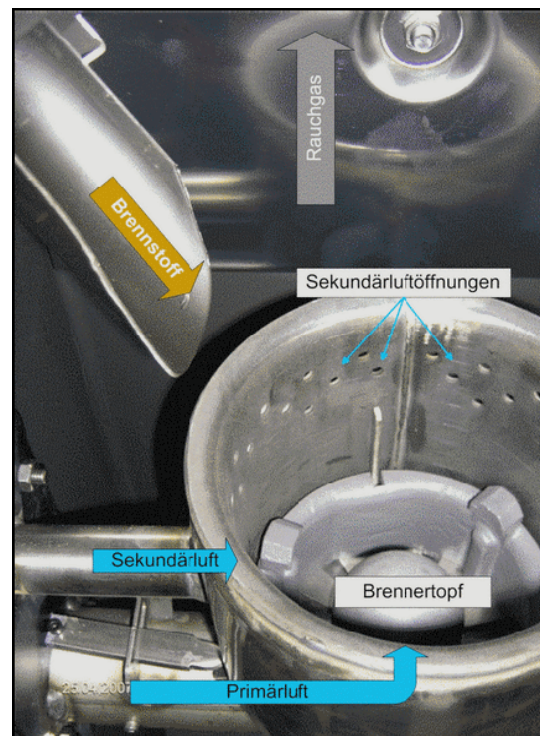
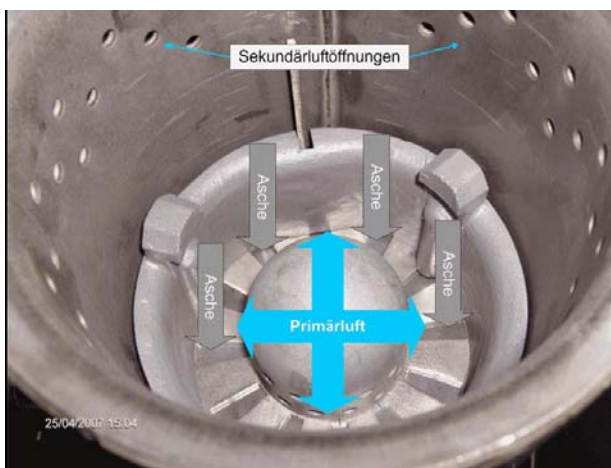


Abb. A-0-5: Aufbau des Vitotig VL3A (Bild oben links) und Funktionsprinzip der Brennstoff- und Luftzufuhr sowie der Ascheaustragung im Feuerraum (unteren Bilder), /129/, /248/

Bisher erschienene DBFZ Reports

DBFZ Report Nr. 1

Bewertung und Minderung von Feinstaubemissionen aus häuslichen Holzfeuerungsanlagen

Autoren: Volker Lenz, Daniela Thrän, Hans Hartmann, Peter Turowski, Frank Ellner-Schubert (TFZ), Joachim Gerth (TUHH)

DBFZ Report Nr. 2

Methodische Vorgehensweise zur Standortidentifikation und Planung der Biomassebereitstellung für Konversionsanlagen am Beispiel von Bio-SNG-Produktionsanlagen

Autor: Michael Seiffert

DBFZ Report Nr. 3

Feinstaubminderung im Betrieb von Scheitholzkaminöfen unter Berücksichtigung der toxikologischen Relevanz

Autor: Volker Lenz

DBFZ Report Nr. 4

Identifizierung strategischer Hemmnisse und Entwicklung von Lösungsansätzen zur Reduzierung der Nutzungskonkurrenzen beim weiteren Ausbau der Biomassenutzung

Autoren: Daniela Thrän, Matthias Edel, Janine Pfeifer, Jens Ponitka, Michael Rode / Silke Knispel (iup)

DBFZ Report Nr. 5

Optimierung und Bewertung von Anlagen zur Erzeugung von Methan, Strom und Wärme aus biogenen Festbrennstoffen

Autor: Stefan Rönsch

DBFZ Report Nr. 6

Katalytisch unterstützte Minderung von Emissionen aus Biomasse-Kleinfeuerungsanlagen

Autoren: Ingo Hartmann, Volker Lenz, Marian Schenker, Christian Thiel, Markus Kraus, Mirjam Matthes, Ulf Roland (UFZ), René Bindig, Wolf-Dietrich Einicke (Universität Leipzig)

DBFZ Report Nr. 7

Final Report - Global and Regional Spatial Distribution of Biomass Potentials - Status quo and options for specification -

Autoren: DBFZ / ZALF / DLR / ILB / vTI

DBFZ Report Nr. 8 - Kompakt -

Autoren: Ulrike Seyfert, Katja Bunzel, Daniela Thrän, Eric Mauky, Barbara Fritsche, André Schreiber, Jan Liebetrau, Thomas Schmidt, Tobias Ulbricht, Volker Lenz

DBFZ Report Nr. 9

Analyse und Bewertung ausgewählter zukünftiger Biokraftstoffoptionen auf der Basis fester Biomasse

Autorin: Franziska Müller-Langer

DBFZ Report Nr. 10

Ermittlung des Verbrauchs biogener Festbrennstoffe im Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD-Sektor) - Endbericht

Autoren: Cornelia Viehmann, Tanja Westerkamp, Andre Schwenker, Marian Schenker, Daniela Thrän, Volker Lenz, Marcel Ebert (IE)

DBFZ Report Nr. 11

Monitoring Biokraftstoffsektor

Autoren: Karin Naumann, Katja Oehmichen, Martin Zeymer, Franziska Müller-Langer, Mattes Scheftelowitz, Philipp Adler, Kathleen Meisel, Michael Seiffert

DBFZ Report Nr. 12

Monitoring zur Wirkung des Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) auf die Entwicklung der Stromerzeugung aus Biomasse

Autoren: Janet Witt, Daniela Thrän, Nadja Rensberg, Christiane Hennig, Karin Naumann, Eric Billig, Philipp Sauter, Jaqueline Daniel-Gromke, Alexander Krautz (DBFZ), Christian Weiser, Gerd Reinhold, Torsten Graf (TLL)

DBFZ Report Nr. 13

Basisinformationen für eine nachhaltige Nutzung von landwirtschaftlichen Reststoffen zur Bioenergiebereitstellung

Autoren: Vanessa Zeller, Daniela Thrän, Martin Zeymer, Bernhard Bürzle, Philipp Adler, Jens Ponitka, Jan Postel, Franziska Müller-Langer, Stefan Rönsch, Arne Gröngröft, Claudia Kirsten, Nadja Weller, Marian Schenker, Harald Wedwitschka (DBFZ), Bernhard Wagner, Peter Deumelandt, Frank Reinicke (INL), Armin Vetter, Christian Weiser (TLL), Klaus Henneberg, Kirsten Wiegmann (Öko-Institut)

Sonderheft zum DBFZ Report

Bioenergie heute und morgen - 11 Bereitstellungskonzepte -

Autoren: Daniela Thrän, Katja Bunzel, Cornelia Viehmann, Daniel Büchner, Erik Fischer, Elmar Fischer, Arne Gröngröft, Christiane Hennig, Franziska Müller-Langer, Katja Oehmichen, Stefan Rönsch, Frank Scholwin

Weitere Informationen: <http://www.dbfz.de/web/referenzen-publikationen>



**DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum
gemeinnützige GmbH**
Torgauer Straße 116
04347 Leipzig
Tel.: +49 (0)341 2434-112
Fax: +49 (0)341 2434-133
info@dbfz.de

www.dbfz.de