

HANDBUCH ZUM QUALITÄTSMANAGEMENT VON HOLZHACKSCHNITZELN



HINTERGRÜNDE
BEREITSTELLUNG
QUALITÄTSSICHERUNG

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.

IMPRESSUM

Diese Arbeit wurde im Rahmen des Verbundprojektes „qualiS – Brennstoffqualifizierung und Qualitätsmanagement in der Hackschnitzelproduktion als Beitrag zur Emissionsminderung und Nachhaltigkeit“ angefertigt.

Förderkennzeichen (FKZ) der Teilvorhaben: 22031814 (TV1), 2203571 (TV2), 22035814 (TV3), 22005815 (TV4)

Gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Projektpartner: Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF)
Bundesverband Bioenergie e. V. (BBE)
DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH
Hochschule für Angewandte Wissenschaft und Kunst Hildesheim/Holzminde/Göttingen (HAWK)
Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ)

Herausgeber:	Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) OT Gülzow, Hofplatz 1, 18276 Gülzow-Prüzen Tel.: 03843/6930-0, Fax: 03843/6930-102 info@fnr.de www.fnr.de	Bundesverband Bioenergie e. V. (BBE) Godesberger Allee 142–148, 53175 Bonn Tel.: 0228/81002-22, Fax: 0228/81002-58 info@bioenergie.de www.bioenergie.de
---------------------	--	--

Autoren

Bernd Geisen (BBE), Fabian Givers (HAWK), Dr. Daniel Kuptz (TFZ), David Peetz (DBFZ), Dr. Torsten Schmidt-Baum (DBFZ), Claudia Schön (TFZ), Katrin Schreiber (LWF), Fabian Schulmeyer (LWF), Toni Thudium (BBE), Dr. Volker Zelinski (HAWK), Dr.-Ing. Thomas Zeng (DBFZ)

Redaktion

durch Autoren

Bilder

Titel: Bundesverband Bioenergie e. V. (BBE), S. 4 u. a.: G.Nodorft/Fotolia
Sofern nicht am Bild vermerkt: Verbundprojekt qualiS

Gestaltung/Realisierung

www.tangram.de, Rostock

Druck

Kern GmbH, Bexbach

Gedruckt auf 100 % Recyclingpapier mit Farben auf Pflanzenölbasis

Bestell-Nr. 910
2. überarbeitete Auflage
FNR 2023

Alle Rechte vorbehalten.

Kein Teil dieses Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung der Herausgeber in irgendeiner Form reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt, verbreitet oder archiviert werden.

ISBN 978-3942147-35-4

HANDBUCH ZUM QUALITÄTSMANAGEMENT VON HOLZHACKSCHNITZELN





INHALT

1	Einleitung	5
	<i>Bernd Geisen (BBE), Toni Thudium (BBE) und Daniel Kuptz (TFZ)</i>	
2	Energiepolitischer Hintergrund und rechtliche Rahmenbedingungen in Deutschland	8
	<i>Daniel Kuptz (TFZ) – grundlegende Überarbeitung 2021 des ursprünglichen Textes von Thorsten Schmidt-Baum (DBFZ) und David Peetz (DBFZ)</i>	
2.1	Energiepolitischer Hintergrund	8
2.2	Rechtliche Rahmenbedingungen	9
2.2.1	Gebäudeenergiegesetz (GEG)	9
2.2.2	Bundes-Immissionsschutzgesetz – BImSchG	10
2.3	Förderung von Hackschnitzelheizungen	11
3	Marktbetrachtungen kleiner und mittlerer Hackschnitzelfeuerungen	13
	<i>David Peetz (DBFZ) und Daniel Kuptz (TFZ – Aktualisierung 2021)</i>	
3.1	Anlagenbestand kleiner und mittlerer Hackschnitzelfeuerungen	13
3.2	Brennstoffeinsatz in kleinen und mittleren Hackschnitzelfeuerungen	14
3.3	Investitionskosten von Hackschnitzelheizungsanlagen	18
3.4	Preisentwicklung bei Holzhackschnitzeln	18
3.5	Zusammenfassung	19
4	Strukturen der Hackschnitzelproduzenten und Nachfrage nach qualitativ hochwertigen Holzhackschnitzeln	20
	<i>David Peetz (DBFZ) und Daniel Kuptz (TFZ – Aktualisierung 2021)</i>	
4.1	Allgemeine Strukturen der Hackschnitzelproduzenten	20
4.1.1	Vermarktung von Holzhackschnitzeln nach den Brennstoffspezifikationen der DIN EN ISO 17225-4 und weiterer Normen	20
4.1.2	Identifizierung der Abnehmer von Holzhackschnitzeln	22
4.1.3	Anzahl vermarkteter Hackschnitzelsortimente	22
4.1.4	Bezug des Ausgangsmaterials für die Hackschnitzelbereitstellung	22
4.2	Nachfrage und Bedarf an qualitativ hochwertigen Holzhackschnitzeln	24
4.3	Zusammenfassung	24
5	Brennstoffqualität von Holzhackschnitzeln	27
	<i>Daniel Kuptz (TFZ) und Volker Zelinski (HAWK)</i>	
5.1	Qualitätsparameter und deren Einfluss auf die Verbrennung	27
5.2	Normung und Zertifizierung	28
6	Holzhackschnitzelproduktion	30
	<i>Daniel Kuptz (TFZ) und Fabian Schulumeyer (LWF)</i>	
6.1	Brennstoffqualität bei der Holzhackschnitzelproduktion im Wald	30
6.2	Lagerung und natürliche Trocknung von Waldhackschnitzeln und Hackholz	32
6.3	Weitere Quellen für Holzhackschnitzel	33
6.4	Empfehlungen für den Eigenverbraucher	34



7	Mechanische Aufbereitung von Holzhack-schnitzeln durch Siebung und Trocknung	35
	<i>Daniel Kuptz (TFZ), Kathrin Schreiber (LWF) und Fabian Schulmeyer (LWF)</i>	
7.1	Sieb- und Trocknungstechniken	35
7.1.1	Siebtechnik	35
7.1.2	Trocknungstechnik	37
7.2	Fallstudien zur Hackschnitzelaufbereitung	39
7.2.1	Fallstudie 1: Gekoppelte Aufbereitung mittels Wälzbettrockner und Schwingsieb	40
7.2.2	Fallstudie 2: Entkoppelte Aufbereitung mittels Containertrocknung und Sternsieb	42
7.2.3	Fallstudie 3: Entkoppelte Aufbereitung mittels Trommelsieb und Trocknung im Haufwerk	45
7.2.4	Fallstudie 4: Aufbereitung mittels Schubbodentrockner (Eigenbau)	46
7.2.5	Fallstudie 5: Entkoppelte Aufbereitung mittels Sternsieb und Trocknung im Haufwerk	48
7.2.6	Fallstudie 6: Aufbereitung mittels Bandrockner und Schwingsieb (gekoppelt) und mittels Trommelsieb (entkoppelt)	51
7.2.7	Zusammenfassung Brennstoffqualität	54
7.2.8	Zusammenfassung Produktionskosten	55
8	Emissionsverhalten von aufbereiteten Waldrestholzackschnitzeln	57
	<i>Thomas Zeng (DBFZ), Claudia Schön (TFZ) und Daniel Kuptz (TFZ)</i>	
8.1	Durchführung der Verbrennungsversuche	57
8.2	Feuerungsseitige Optimierungspotenziale	58
8.3	Brennstoffseitige Optimierungspotenziale	59
8.4	Zusammenfassung und Empfehlungen für Nutzer von Feuerungen mit Qualitätshackschnitzeln aus Waldrestholz	64
9	Qualitätsmanagement für die Holzackschnitzelbereitstellung	66
	<i>Volker Zelinski (HAWK) und Fabian Givers (HAWK)</i>	
9.1	Schritte der Qualitätssicherung	67
9.2	Kontrollpunkte und Qualitätssicherungsmaßnahmen	72
9.3	Ergänzende Maßnahmen zur Qualitätsverbesserung	73
10	Vereinfachte Methoden zur Selbstüberwachung der Holzackschnitzelqualität	74
	<i>Dr. Volker Zelinski (HAWK) und Fabian Givers (HAWK)</i>	
10.1	Vereinfachte Methoden der Selbstüberwachung	74
10.2	Probenahmen angelehnt an die DIN EN ISO 21945	75
10.3	Bestimmung des Wassergehalts	76
10.4	Bestimmung der Partikelgrößenverteilung und des Feinanteils	77
10.5	Validierung der Methoden (Vergleich mit Analysen und Normen)	79
11	Zusammenfassung	84
	<i>Toni Thudium (BBE) und Daniel Kuptz (TFZ)</i>	
	Literaturverzeichnis	87



EINLEITUNG



1 EINLEITUNG

Energieholz ist eine regenerative und nachhaltige Energiequelle, die einen wesentlichen Beitrag zur Umsetzung der Wärmeenergie leistet, ohne den die europäischen Klimaschutzziele kaum zu erreichen sind. Betreiber von Holzheizungen erbringen somit einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz, stärken regionale Wertschöpfungskreisläufe und erzielen durch eine preiswerte Brennstoffversorgung nicht zuletzt auch ökonomische Vorteile. Die nachhaltige Bewirtschaftung unserer Wälder garantiert uns dabei, dass der Brennstoff Holz auch über Generationen hinaus in angemessener Menge zur Verfügung steht. Die moderne Holznutzung ist allerdings mit hohen Anforderungen hinsichtlich Effizienz und Emissionsverhalten verknüpft. Angesichts der Stufe 2 der 1. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (1. BImSchV), die Anfang 2015 in Kraft trat, muss sich der Anlagenbetreiber die Frage stellen, wie umweltrechtlichen Anforderungen, insbesondere vor dem Hintergrund stark reduzierter Grenzwerte für Gesamtstaub und Kohlenstoffmonoxid (CO), entsprochen werden kann. Neben den anlagenseitigen Faktoren hat die Brennstoffqualität einen entscheidenden Einfluss auf das Emissionsverhalten und einen störungsarmen Heizbetrieb. Dies gilt insbesondere bei der energetischen Verwertung von Holzhackschnitteln (HHS). Es ist daher zu erwarten, dass zukünftig Brennstoffe, die sich aufgrund ihrer optimierten Brennstoffeigenschaften positiv auf das Emissionsverhalten und den störungsarmen Betrieb auswirken, verstärkt nachgefragt werden.

Mit dem vorliegenden Handbuch werden die Ergebnisse aus einem über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) geförderten Verbundprojekts „qualiS“, welches sich mit den o. g. Fragestellungen und Erwartungen auseinandergesetzt hat, vorgestellt. Es handelt sich um die umfassend aktualisierte, 2. Auflage aus dem Jahr 2022, in welcher v. a. die Kapitel zu den rechtlichen Rahmenbedingungen und zur Förderung (Kapitel 2), zum Markt (Kapitel 3) und zur Normung (Kapitel 5) auf den aktuellen Stand (2021) gebracht wurden. Ebenso wurden die Kapitel 4, 6, 7, 8, 9 und 10 an den entsprechenden Stellen aktualisiert.

Das Handbuch ist mit seinen verschiedenen Kapiteln modular angelegt, sodass es dem Anwender möglich ist, direkt in das jeweilige Interessensgebiet einzusteigen. Dabei werden

komplexe Zusammenhänge allgemein verständlich und praxisnah dargestellt. Zu Beginn werden in Kapitel 2 die relevanten energiepolitischen und rechtlichen Rahmenbedingungen in Deutschland aufgezeigt. Es werden Fördermöglichkeiten für automatisch beschickte Holzfeuerungen im kleinen Leistungsbereich dargestellt sowie die damit einhergehenden Anforderungen hinsichtlich Effizienz und einzuhaltender Emissionsgrenzwerte erläutert. In Kapitel 3 wird der deutsche Markt für kleine und mittlere Holzhackschnittel-Feuerungsanlagen, die keiner Genehmigung nach § 4 des Bundes-Immissionsschutzgesetzes bedürfen und mit einer Leistung < 1 Megawatt (MW) im Geltungsbereich der 1. BImSchV liegen, näher beleuchtet. Über den ermittelten Anlagenbestand und die Brennstoffnachfrage der vergangenen Jahre wird der aktuelle Jahres-Holzhackschnittelbedarf für Anlagen im kleinen Leistungsbereich abgeschätzt. Auf Basis einer deutschlandweiten Produzentenumfrage zur Aufbereitung und Zertifizierung von Qualitätshackschnitzeln (QHS) werden in Kapitel 4 sowohl allgemeine Strukturen der Hackschnitzelproduzenten als auch die der Hackschnitzelabnehmer dargestellt. Weiterhin werden Aussagen über das Marktpotenzial und das vorrangige Einsatzgebiet von QHS getroffen.

Insbesondere für sehr heterogene Naturprodukte wie Holzhackschnittel, bei denen die Qualität aufgrund unterschiedlicher Ausgangsmaterialien und verschiedener Prozessketten zur Hackschnitzelbereitstellung stark schwanken kann, bedarf es einer Möglichkeit zur Beschreibung der vorliegenden Brennstoffqualität und die Kenntnis über die wichtigsten Parameter und deren Einfluss auf die Verbrennung. Kapitel 5 fasst hier das wichtigste Wissen zusammen. An dieser Stelle knüpft Kapitel 6 an und geht weiter auf die Hackschnitzelproduktion im Wald und die dazugehörigen Optimierungsmöglichkeiten bezüglich einer verbesserten Brennstoffqualität ein. Es werden praxisnahe Empfehlungen sowohl für den professionellen Produzenten als auch für den Selbstversorger mit einer weniger mechanisierten Ausrüstung aufgezeigt. Neben der Auswahl eines geeigneten Ausgangsmaterials und dem passenden Ernte- und Bringungsverfahren hat u. a. auch die korrekte Lagerung einen bedeutenden Einfluss auf die spätere Qualität der Holzhackschnittel. Sollte die dadurch erzielte Qualität für den angestrebten Verwendungszweck nicht ausreichen, so kann diese durch weitere



Aufbereitung von Holzhackschnitzeln mit einem Schwingsieb

Aufbereitungsmaßnahmen, wie z. B. die technische Trocknung und Siebung, weiter verbessert werden. Kapitel 7 erläutert daher zunächst die aktuell dem Stand der Technik entsprechenden Aufbereitungsverfahren. Die Frage nach Möglichkeiten der Qualitätsverbesserung und der Einflussstärke verschiedener Maßnahmen wird anhand von sechs konkreten Fallstudien erläutert und über die erhobenen Kosten die Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen abgeleitet. In anschließenden Feuerungsversuchen wurde dann der Frage nachgegangen, welche Auswirkungen qualitativ hochwertige Holzhackschnitzel auf das Emissionsverhalten einer Feuerung haben können und ob das Emissionsminderungspotenzial ausreichend groß ist, um den Vorgaben der 1. BImSchV ohne weitere Abgasbehandlung (z. B. über elektrostatische Staubabscheider) gerecht zu werden. Die Ergebnisse sowie die Methodik der Feuerungsversuche sind in Kapitel 8 näher beschrieben.

Befasst man sich mit der Herstellung und Bereitstellung von Holzhackschnitzeln, so ist die Einführung von qualitätssichernden Maßnahmen eine sinnvolle Methode, um langfristig und nachweislich Brennstoffe gleichbleibender Qualität zu gewährleisten. Kapitel 9 und 10 stehen hierbei als Leitfaden zur Einführung eines Qualitätsmanagementsystems zur Verfügung. Zu diesem Zweck beinhalten die Kapitel Informationen zu sinnvollen Kontrollpunkten in der Prozesskette und der zugehörigen korrekten Probenentnahme. Für wichtige Parameter wurden vereinfachte Methoden entwickelt. Obwohl diese Methoden an die geltenden Normen angelehnt sind, ist deren Durchführung vergleichsweise anwenderfreundlich und mit relativ einfacher

Ausrüstung durchführbar. Eine ausreichende Übereinstimmung der vereinfachten Methoden mit den Ergebnissen der Standardmethoden nach Norm konnte nachgewiesen werden. Somit erhält der selbstproduzierende Eigenversorger ein Instrument zur Überprüfung seiner Brennstoffqualität und der professionelle HHS-Händler die Möglichkeit einer kontinuierlichen und effizienten Prozessüberwachung.

Das Handbuch richtet sich damit an alle Unternehmen, Institutionen und Personen, welche sich für eine optimierte und nachhaltige Bereitstellung von Holzhackschnitzeln interessieren. Es wird hierbei insbesondere auf den professionellen Produzenten, Aufbereiter und Händler, aber auch auf den Selbsterzeuger eingegangen. Aber auch Betreiber von Hackschnitzelheizungen im kleinen Leistungssegment, Kontraktoren, gewerbliche und kommunale Kleinanlagenbetreiber, Qualitätsmanager und Kesselhersteller finden in diesem Handbuch sachdienliche Informationen zu einem optimierten Umgang mit dem Brennstoff Holzhackschnitzel. Die nachfolgenden Empfehlungen und Hinweise sollen dem Anwender dabei helfen, einen kontinuierlich hochwertigen Brennstoff zu erzeugen und dessen Qualität zu charakterisieren und zu kontrollieren, sodass eine optimale Verbrennung sowie ein effektiver und umweltfreundlicher Heizbetrieb bei automatisch beschickten Kleinfeuerungsanlagen mit Holzhackschnitzeln gewährleistet wird.

The background of the page is a close-up photograph of wood chips, which are small, irregular pieces of wood. The chips are light brown and have a rough, fibrous texture. They are scattered across the entire page, with some in sharp focus and others blurred in the background. The lighting is even, highlighting the natural grain and color of the wood.

KAPITEL 2

Energiepolitischer Hintergrund und rechtliche
Rahmenbedingungen in Deutschland

2 ENERGIEPOLITISCHER HINTERGRUND UND RECHTLICHE RAHMENBEDINGUNGEN IN DEUTSCHLAND

Der Staat bietet eine Reihe von Fördermöglichkeiten für die Anschaffung von Biomasseheizanlagen. Zugleich stellt er aber auch Forderungen an deren Effizienz und setzt Grenzwerte bezüglich der zulässigen Emissionen, die bei der Verbrennung biogener Festbrennstoffe frei werden. Im Nachfolgenden werden die wesentlichen politischen und derzeit geltenden rechtlichen Rahmenbedingungen sowie relevante Förderrichtlinien kurz erläutert.

2.1 Energiepolitischer Hintergrund

Im Jahr 2015 einigten sich mehr als 190 Staaten auf der 21. UN-Klimakonferenz in Paris auf ein neues, globales Klimaschutzabkommen [2-1]. Die Staaten setzten sich dabei das Ziel,

den globalen Anstieg der weltweiten Durchschnittstemperatur langfristig auf „deutlich unter“ 2 °C im Vergleich zu vorindustriellen Werten zu begrenzen. Wesentliches Ziel ist dabei, den globalen Temperaturanstieg auf 1,5 °C zu minimieren. Insgesamt 197 Vertragsparteien haben das „Pariser Abkommen“ unterzeichnet. Zu den Vertragsparteien zählen die EU sowie ihre Mitgliedstaaten, darunter die Bundesrepublik Deutschland.

Ausgehend von den Vorgaben des Pariser Abkommens haben sich alle 27 EU-Mitgliedstaaten verpflichtet, die EU bis 2050 klimaneutral zu machen. Sie vereinbarten hierzu, die Emissionen an Treibhausgasen bis zum Jahr 2030 um mindestens 55 % gegenüber dem Stand von 1990 zu senken. Bis zum Jahr 2050 sollen alle Treibhausgasemissionen in der Europäischen Union soweit wie möglich vermieden werden und die

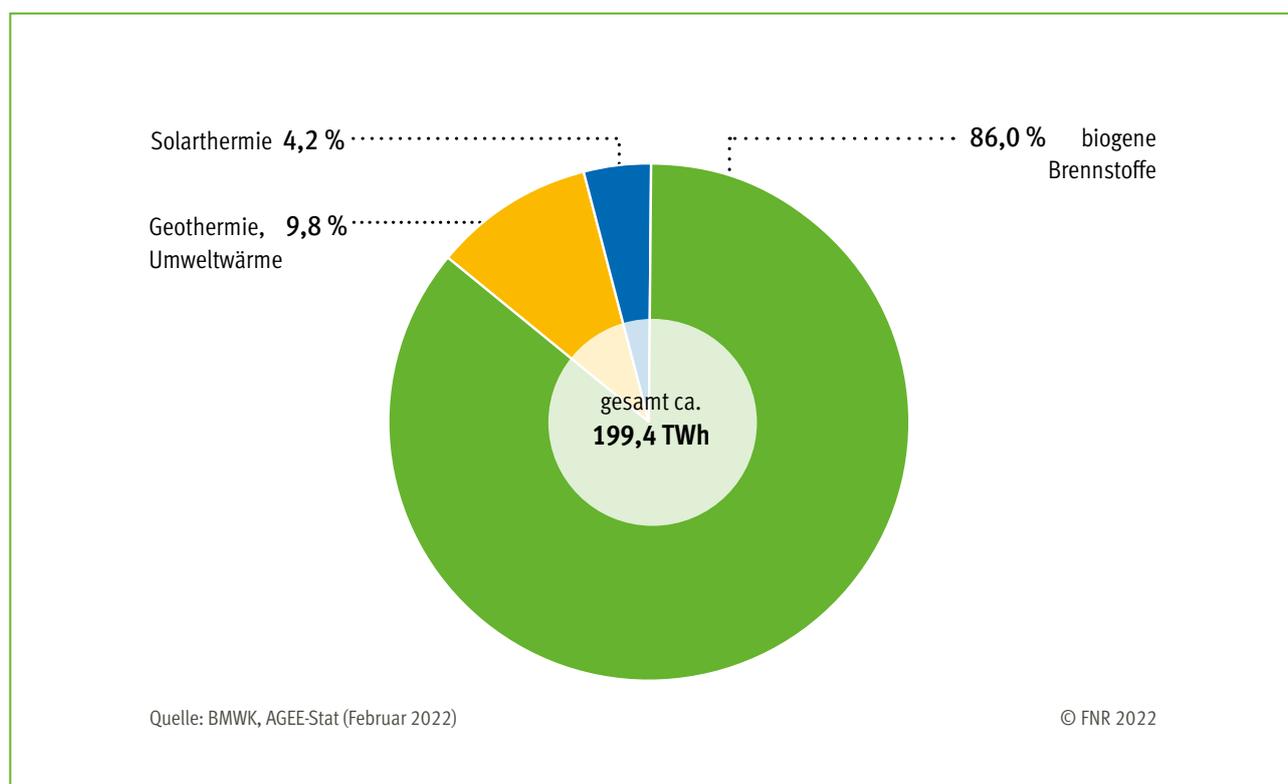


Abbildung 2.1: Endenergieverbrauch erneuerbare Energien für Wärme und Kälte in Deutschland im Jahr 2020: ca. 180 TWh [2-4]

EU als erster Kontinent treibhausgasneutral sein. Für die Umsetzung dieser Zielvorgaben wurde der Europäische „Green Deal“ als Wachstumsstrategie für die nächsten Jahre vorgelegt. In diesem schlägt die Europäische Kommission u. a. vor, die verbindliche Zielvorgabe für erneuerbare Energien im Energiemix der EU auf 40% im Jahr 2030 anzuheben. Für den Gebäudesektor empfiehlt die Kommission, einen Richtwert von 49% an erneuerbaren Energien in Gebäuden bis zum Jahr 2030 festzulegen. Gleichzeitig soll die Nutzung von erneuerbarer Energie zur Wärme- und Kälteerzeugung in diesem Sektor bis zum Jahr 2030 um jährlich 1,1 Prozentpunkte erhöht werden [2-2]. Die ehrgeizigen Ziele der EU zur Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2050 sollen möglichst bald durch Verabschiedung des ersten Europäischen Klimaschutzgesetzes rechtlich für alle Mitgliedstaaten festgeschrieben werden.

Aufgrund der Vorgaben der EU und einem Urteil des Bundesverfassungsgerichts vom 29. April 2021 verschärfte die Bundesregierung im Jahr 2021 ihre Klimaschutzvorgaben, die im Klimaschutzgesetz aus dem Jahr 2019 festgeschrieben sind. Demnach soll Deutschland bereits bis zum Jahr 2045 treibhausgasneutral sein. Bis zum Jahr 2030 sollen dazu die Treibhausgasemissionen der Bundesrepublik um 65% gegenüber dem Jahr 1990 sinken [2-3]. Ein wesentlicher Schwerpunkt dieser Bemühungen ist die Umstellung des Energiesystems auf erneuerbare Energiequellen. Rund die Hälfte des Endenergieverbrauchs in Deutschland wird dabei für Raum- und Prozesswärme sowie für Warmwasser benötigt. Im Jahr 2020 betrug der Anteil der erneuerbaren Energien am Endenergieverbrauch für Wärme und Kälte etwa 15,2% [2-4]. Dabei spielen die biogenen Festbrennstoffe, darunter die thermische Nutzung von Holz, eine wesentliche Rolle. Abbildung 2.1 macht deutlich, dass die Klimaschutzziele der Bundesrepublik im Wärme- und Kältebereich nicht ohne den Einsatz biogener Festbrennstoffe erreicht werden können.

Die Vorgaben des Pariser Abkommens, der EU und des deutschen Klimaschutzgesetzes finden sich in zahlreichen nationalen Gesetzen und Verordnungen wieder. Nach dem Grundsatz „Fordern und Fördern“ verankerte die Bundesregierung beispielsweise in dem „Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden“ aus dem Jahr 2020 – kurz: Gebäudeenergiegesetz (GEG) – die Verpflichtung zum Einsatz von erneuerbaren Energien zur Beheizung oder Kühlung von Gebäuden (betrifft Neubauten oder die Sanierung öffentlicher Nichtwohngebäude, siehe Abschnitt 2.2.1). Das GEG führt dabei die energieeinsparrechtlichen Vorgaben unterschiedlicher Gesetze und Verordnungen, beispielsweise des Energieeinspargesetzes (EnEG), der Energieeinsparverordnung (EnEV) oder des Erneuerbare-Energien-Wärme-Gesetzes (EEWärmeG), in einem Gesetz zusammen. Zugleich erhalten Wohnungseigentümer, Unternehmen und Kommunen Förderungen über die „Bundesförderung für effiziente Gebäude“ (BEG), um beispielsweise ihre Wärmeversorgung auf erneuerbare Energiequellen umzustellen.

Weitere Informationen zur Entwicklung erneuerbarer Energien und zu der diesbezüglichen Gesetzgebung in der Bundesrepublik Deutschland finden Sie u. a. auf der Service-Seite des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWK).

2.2 Rechtliche Rahmenbedingungen

2.2.1 Gebäudeenergiegesetz (GEG)

Zweck des am 1. November 2020 in Kraft getretenen GEG ist der möglichst sparsame Einsatz von Energie in Gebäuden einschließlich einer zunehmenden Nutzung erneuerbarer Energien zur Erzeugung von Wärme, Kälte und Strom für den Gebäudebetrieb. Das GEG führt dabei außer Kraft getretene Gesetze und Verordnungen, wie beispielsweise das Erneuerbare-Energien-Wärme-Gesetz (EEWärmeG), das Energieeinspargesetz (EnEG) oder die Energieeinsparverordnung (EnEV) zusammen. Das GEG bezieht sich sowohl auf Neubauten als auch auf Bestandsgebäude. Es schreibt u. a. vor, dass neue Gebäude als „Niedrigstenergiegebäude“ zu errichten sind. Dies umfasst Vorgaben bezüglich einer Begrenzung des Jahres-Primärenergiebedarfs und der Verluste über die Gebäudehülle sowie eine Verpflichtung zum anteiligen Einsatz von erneuerbaren Energien. Bei öffentlichen Nichtwohngebäuden gilt Letzteres auch bei der Sanierung von Bestandsgebäuden.

Die Anforderung des GEG zum Einsatz von erneuerbaren Energien in Neubauten gilt als erfüllt, wenn der Wärmebedarf des Gebäudes zu mindestens 50% durch die Nutzung biogener Festbrennstoffe gedeckt wird. Bei der Sanierung öffentlicher Nichtwohngebäude sind mindestens 15% gefordert. Für

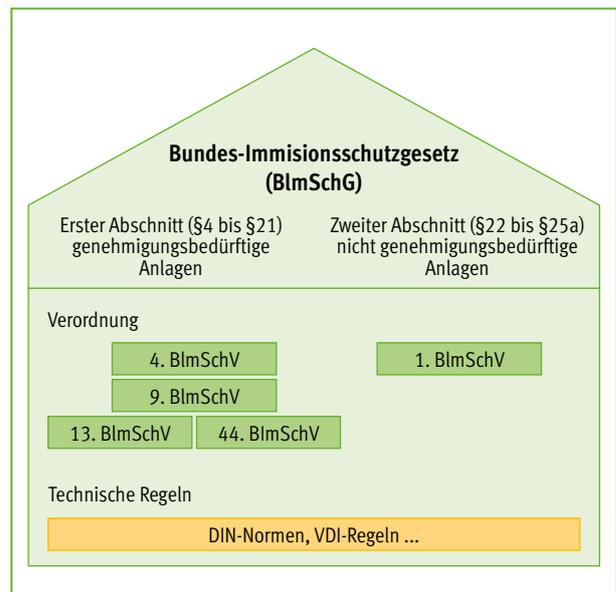


Abbildung 2.2: Zusammenhang zwischen dem BImSchG und ausgewählten Verordnungen sowie den technischen Regeln nach [2.7], 2021 aktualisiert

Feuerungen < 1 MW, d. h. für Anlagen im Geltungsbereich der 1. BImSchV, gilt zudem, dass die Brennstoffe in einem Biomassekessel oder in einem automatisch beschickten Biomasseofen mit Wasser als Wärmeträger genutzt werden müssen. Als Brennstoffe kommen dabei die Nummern 4, 5, 5a, 8 oder 13 nach § 3 der 1. BImSchV, beispielsweise naturbelassene Brennstoffe wie Holzhackschnitzel aus Waldholz oder Holzpellets in Frage.

Daneben sieht das GEG die Abkehr von fossilen Brennstoffen für die Beheizung von Gebäuden vor. Für alte Öl- und Gas-Konstanttemperaturkessel mit einer Nennleistung von 4 bis 400 kW, die älter als 30 Jahre alt sind, gilt nach § 72 GEG ein Betriebsverbot. Auch dürfen ab dem 1. Januar 2026 Heizkessel, die mit Heizöl oder mit festem fossilem Brennstoff beschickt werden, nur in Ausnahmefällen in ein Gebäude eingebaut werden. Weiterhin regelt das GEG den Vollzug, beispielsweise die Vorlegung einer Erfüllungserklärung bei der zuständigen Behörde, die Aufgaben des bevollmächtigten Bezirksschornsteinfegers oder Anforderungen an private Nachweise. So müssen u. a. Abrechnungen bei dem Bezug von biogenen Festbrennstoffen für die Nutzung in 1. BImSchV-Anlagen die Angaben beinhalten, dass es sich um Brennstoffe der Nummern 4, 5, 5a oder 8, also um naturbelassene Biomasse handelt.

Neben zahlreichen Vorschriften sieht das GEG vor, dass die Nutzung erneuerbarer Energien für die Erzeugung von Wärme oder Kälte in Neubauten oder bei der energetischen Sanierung im Gebäudebestand durch die Bundesrepublik Deutschland gefördert werden kann. Dies erfolgt über die „Bundesförderung für effiziente Gebäude“ (BEG). Biomassefeuerungen, die zur Heizung oder zur Warmwasseraufbereitung dienen, müssen dabei nach GEG einen Kesselwirkungsgrad von mindestens 89 % aufweisen (bzw. 70 %, wenn sie nicht der Heizung oder Warmwasserbereitung dienen, § 90 [2] GEG). Diese Anforderungen werden durch die BEG teilweise verschärft.

Eine aktuelle Fassung des GEG finden Sie auf der Service-seite www.gesetze-im-internet.de des Bundesministeriums für Justiz und Verbraucherschutz.

2.2.2 Bundes-Immissionsschutzgesetz – BImSchG

Bei der Planung von Biomasseheizanlagen sind immer deren Genehmigungsbedürftigkeit zu prüfen und die sich daraus ergebenden Anforderungen hinsichtlich der Anlagenauslegung zu berücksichtigen. Dabei ist grundsätzlich das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) zu beachten, dessen Zweck der Schutz von Menschen, Tieren, Pflanzen, Böden, Wasser, Atmosphäre und Kulturgütern vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnlichen Vorgängen ist. Einzelheiten werden in entsprechenden Verordnungen geregelt.

Die Charakterisierung der Anlagen, die genehmigungspflichtig sind, erfolgt in der „Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen“ (4. BImSchV). Die 9. BImSchV (Verordnung über das Genehmigungsverfahren) beinhaltet die Regelungen über die Durchführung von Genehmigungsverfahren sowie Anforderungen an die Antragsunterlagen. Es wird empfohlen, sich frühzeitig vor Beginn eines Genehmigungsverfahrens von der örtlich zuständigen Genehmigungsbehörde bezüglich der notwendigen Antragsunterlagen und des zeitlichen Ablaufes beraten zu lassen.

Bei der Planung von Großfeuerungsanlagen ab einer Feuerungswärmeleistung von 50 MW ist die 13. BImSchV (Verordnung über Großfeuerungs-, Gasturbinen- und Verbrennungsmotoranlagen), bei einer Anlagengröße mit einer Feuerungswärmeleistung von 1 bis 50 MW die 44. BImSchV (Verordnung über mittelgroße Feuerungs-, Gasturbinen- und Verbrennungsmotoranlagen) zu beachten. Beide Verordnungen legen Anforderungen an diese Anlagen fest, beispielsweise die

Tabelle 2.1: Stufenweise Absenkung der Emissionsgrenzwerte für wiederkehrende Messungen durch die Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen (1. BImSchV)

1. BImSchV			Stufe 1 Anlagen, die nach dem 22. März 2010 errichtet wurden		Stufe 2 Anlagen, die nach dem 31. Dezember 2014 errichtet wurden	
Brennstoff nach § 3 Absatz 1		Nennwärmeleistung [kW]	Staub [g/m³]	CO [g/m³]	Staub [g/m³]	CO [g/m³]
Nr.	Bezeichnung					
4	naturbelassenes stückiges Holz einschl. anhaftender Rinde (Scheitholz*, Hackschnitzel, Reisig, Zapfen)	≥ 4 ≤ 500	0,1	1,0	0,02	0,4
5	Naturbelassenes nicht stückiges Holz (Sägemehl, Späne, Schleifstaub, Rinde)	> 500		0,5		
5a	Presslinge aus naturbelassenem Holz	≥ 4 ≤ 500	0,06	0,8		

* Bei Feuerungen, in denen ausschließlich Brennstoffe nach § 3 Absatz 1 Nummer 4 in Form von Scheitholz eingesetzt werden, gelten die Grenzwerte der Stufe 2 erst für Anlagen, die nach dem 31. Dezember 2016 errichtet wurden.

Grenzwerte für Emissionen (siehe Abbildung 2.2). Für nicht-holzige biogene Festbrennstoffe, beispielsweise für Stroh oder Miscanthus, gilt die 44. BImSchV bereits ab einer Anlagengröße von 100 kW.

Hackschnitzelkessel mit einer Feuerungswärmeleistung kleiner 1 MW, die naturbelassenes stückiges Holz verwenden, zählen zu den nicht genehmigungspflichtigen Anlagen gemäß dem zweiten Abschnitt des BImSchG (§22 bis §25a). Für diese gilt die 1. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen) – 1. BImSchV –, die eine Reduzierung der Immissionsbelastungen im direkten Umfeld der Feuerungsanlage bezweckt sowie eine effizientere Energienutzung fördert.

Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe kleiner 1 MW dürfen nur betrieben werden, wenn sie sich in einem ordnungsgemäßen technischen Zustand befinden. Biomassefeuerungen dürfen dabei gemäß § 3 der 1. BImSchV nur mit Brennstoffen (sogenannten Regelbrennstoffen) betrieben werden, für deren Einsatz sie nach Angaben des Herstellers geeignet sind. Hierunter können beispielsweise naturbelassenes stückiges Holz in Form von Scheiten oder Holzhackschnitzeln (Brennstoff Nr. 4), Sägemehl und Sägespänen (Brennstoff Nr. 5) oder Holzpellets (Brennstoff Nr. 5a) fallen. Stroh und ähnliche pflanzliche Stoffe zählen zu Brennstoff Nr. 8, sonstige nachwachsende Rohstoffe zu Brennstoff Nr. 13. Bei der Auswahl der Brennstoffe sind zudem die Vorgaben des Herstellers an die Brennstoffqualität, insbesondere an den Wassergehalt und die Partikelgröße zu beachten.

Um den Einbau effizienter und emissionsarmer Anlagentechnik voranzutreiben, wurden mit der am 22. März 2010 in Kraft

eines elektrostatischen Staubabscheider, festgelegt. Die Übergangsfristen und Ausnahmeregelungen sind allerdings relativ großzügig (siehe Tabelle 2.2).

Daneben regelt die 1. BImSchV auch die Ableitbedingungen, beispielsweise die Höhe des Kamins. Hierauf ist sowohl bei der Installation einer neuen Anlage als auch bei einer wesentlichen Änderung an einer bestehenden Feuerung zu achten. Beratung hierzu gibt das Schornsteinfegerhandwerk.

Stellen die Emissionsgrenzwerte der 1. BImSchV die Kesselindustrie zunächst noch vor recht große Herausforderungen, führen neue technische Entwicklungen auf dem Kesselmarkt inzwischen zu einer deutlichen Senkung der Emissionen im Praxisbetrieb. In den meisten Fällen, vor allem aber bei einer abnehmenden Brennstoffqualität und einer zunehmenden Anlagengröße, ist der Einbau effektiver, meist elektrostatischer Staubabscheider notwendig. Stellenweise sind diese Anlagen bereits im Kessel verbaut. Die FNR gibt auf ihrer Webseite eine Marktübersicht für Staubabscheider für Anlagen ab 4 kW [2-5].

Weitere Hinweise zum ordnungsgemäßen Betrieb einer Hackschnitzelfeuerung und zu der wiederkehrenden Messung durch das Schornsteinfegerhandwerk werden in der FNR-Broschüre „Hackschnitzelheizungen – Was muss beachtet werden“ wiedergegeben [2-6].

2.3 Förderung von Hackschnitzelheizungen

Bedeutende Förderprogramme für die Nutzung von Hackschnitzeln und anderen biogenen Festbrennstoffen zur Bereitstellung von Wärme in Gebäuden und für die Einspeisung von Wärme in Wärmenetze sind die „Bundesförderung für effiziente Gebäude“ (BEG) [2-8] und die Bundesförderung für effiziente Wärmenetze (BEW) [2-9].

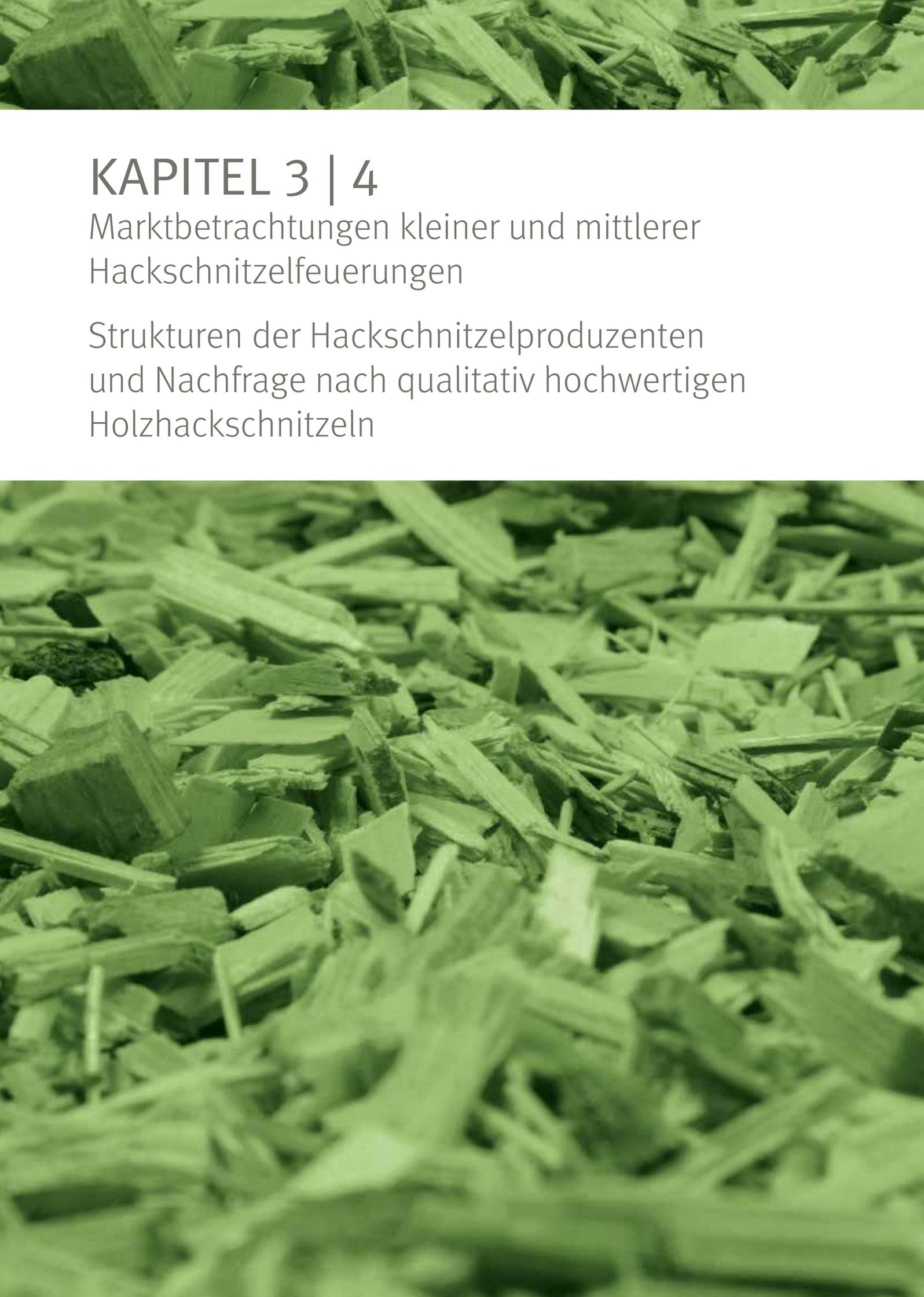
Ein drittes für Hackschnitzelfeuerungen relevantes Förderprogramm auf Bundesebene ist das Modul 2: „Prozesswärme aus Erneuerbaren Energien“ in der Bundesförderung für Energieeffizienz in der Wirtschaft (EEW) [2-10].

Für aktuelle Informationen zu den Förderprogrammen und zu den technischen Mindestanforderungen an Biomasseanlagen wird auf die Internetseiten der vom BMWK mit der Durchführung o.g. Programme beauftragten Anstalten (www.bafa.de, www.kfw.de) verwiesen.

Tabelle 2.2: Übergangsfristen für automatisch beschickte Altanlagen gemäß der 1. BImSchV

Zeitpunkt der Errichtung	Zeitpunkt der Einhaltung der Grenzwerte der Stufe 1 des § 5 Absatz 1
bis einschließlich 31. Dezember 1994	01. Januar 2015
vom 1. Januar 1995 bis einschließlich 31. Dezember 2004	01. Januar 2019
vom 1. Januar 2005 bis einschließlich 21. März 2010	01. Januar 2025

getretenen novellierten Fassung der 1. BImSchV die Anforderungen vor allem an neue Holzfeuerungen durch eine stufenweise Absenkung der Emissionsgrenzwerte für Staub und Kohlenstoffmonoxid (CO) verschärft (siehe Tabelle 2.1). So müssen beispielsweise nach dem 1. Januar 2015 in Betrieb gegangene Anlagen bei der alle zwei Jahre wiederkehrenden Messung durch das Schornsteinfegerhandwerk die sogenannte „Stufe 2“, d. h. einen CO-Wert von 400 mg/m³ und einen Staubgrenzwert von 0,02 g/m³ (bei einem Sauerstoffgehalt von 13% im Abgas) einhalten. Auch für Altanlagen sind zeitlich gestaffelte Regelungen für den Austausch oder die Ertüchtigung zur Verringerung des Gesamtstaubausstoßes, beispielsweise durch Installation

The background of the entire page is a close-up, high-angle shot of a large pile of wood chips. The chips are light brown and tan in color, with some darker, charred pieces scattered throughout. They are irregular in shape and size, ranging from small, thin shavings to larger, chunkier pieces. The lighting is bright, creating a textured, natural appearance. The text is overlaid on a white rectangular area in the upper left quadrant of the image.

KAPITEL 3 | 4

Marktbetrachtungen kleiner und mittlerer
Hackschnitzelfeuerungen

Strukturen der Hackschnitzelproduzenten
und Nachfrage nach qualitativ hochwertigen
Holzhackschnitzeln

3 MARKTBETRACHTUNGEN KLEINER UND MITTLERER HACKSCHNITZELFEUERUNGEN

Hackschnitzelfeuerungsanlagen zählen zu den automatisch betriebenen Biomassefeuerungen und finden sowohl Anwendung in industriellen Heiz- bzw. Heizkraftwerken als auch in kommunalen, gewerblichen und privaten Anlagen. Die thermische Verwertung von Holz hackschnitzeln erfolgt hierbei in Feuerungen verschiedenster Bauart mit Nennwärmeleistungen von 10 kW bis in den hohen zweistelligen Megawattbereich.

Nachfolgende Ausführungen zum Anlagenbestand und zum jährlichen Bedarf von Holz hackschnitzeln beziehen sich im Wesentlichen auf Anlagen, die keiner Genehmigung nach § 4 des Bundes-Immissionsschutzgesetzes bedürfen und mit einer Leistung < 1 MW im Geltungsbereich der 1. BImSchV (1. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes) liegen.

3.1 Anlagenbestand kleiner und mittlerer Hackschnitzelfeuerungen

Entsprechend § 16 der 1. BImSchV ist der Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks – Zentralinnungsverband (ZIV) verpflichtet, die Messergebnisse dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) mitzuteilen. Seit dem Jahr 2018 finden sich in den statistischen Erhebungen des ZIV auch konkrete Schätzungen zum Anlagenbestand von Feuerungsanlagen in Deutschland [3-1]. Der ZIV wies dabei für das Jahr 2020 insgesamt 1.040.000 Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe (ausgenommen Einzelraumfeuerungsanlagen) aus (Abbildung 3.1). In 921.350 dieser Anlagen wurden

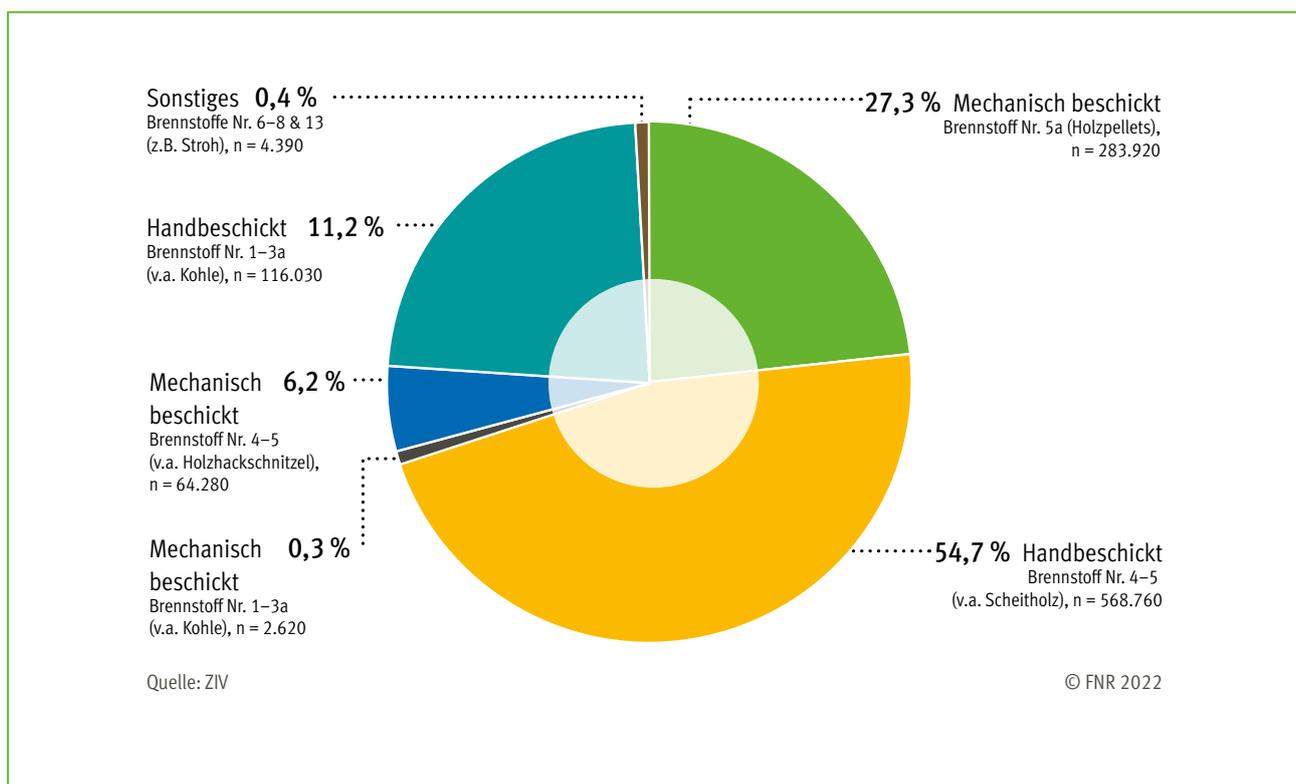


Abbildung 3.1: Gesamtzahl der Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe (ausgenommen Einzelraumfeuerungen) im Jahr 2020 in Deutschland [3-1]

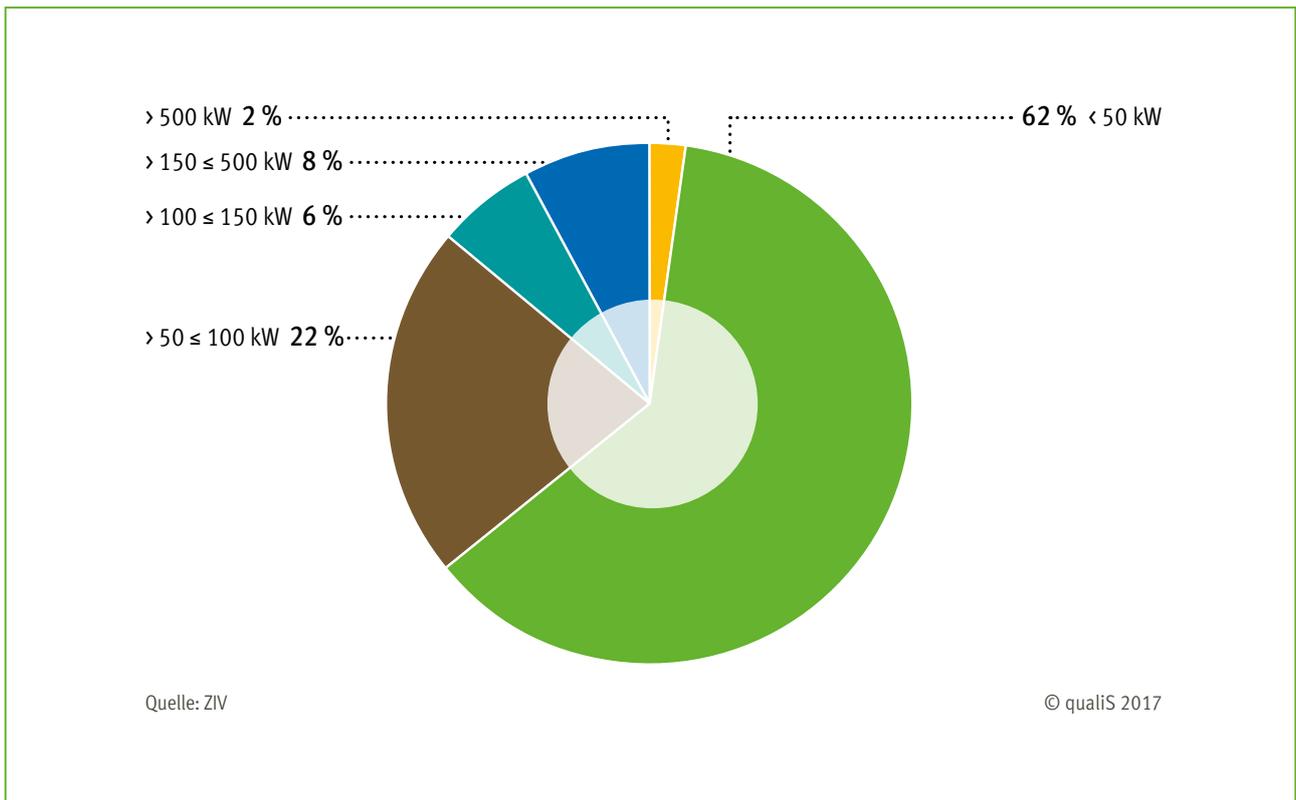


Abbildung 3.2: Verteilung des Hackschnitzelanlagenbestands (1. BlmSchV) nach Leistungsklassen, berechnet aus Erstmessungsdaten des ZIV im Jahr 2011 [3-1]

biogene Festbrennstoffe verbrannt, wobei sich die Anzahl an mechanisch beschickten Feuerungen für Brennstoffe der Nr. 4 und 5 nach § 3 der 1. BlmSchV auf 64.280 Stück belief. Hierbei handelt es sich größtenteils um Hackschnitzelfeuerungen. Der Anlagenbestand an Biomassekessel, in denen Holzhackschnitzel verbrannt werden, stieg dabei laut den Zahlen des ZIV seit 2018 um jeweils ca. 3.500 Anlagen pro Jahr an.

Die Daten des ZIV umfassen sowohl Anlagen der 1. BlmSchV als auch der 44. BlmSchV. Nichtsdestotrotz wurde die Gesamtzahl der geschätzten Holzhackschnitzelfeuerungen aus dem Jahr 2020 als Basiswert für die nachfolgenden Berechnungen zum Anlagenbestand im Geltungsbereich der 1. BlmSchV verwendet. Vereinfacht werden dabei Feuerungen $\geq 1 \text{ MW}$ aus den Daten des ZIV der Leistungsklasse $> 500 \text{ kW}$ zugerechnet. Aufgrund der im Verhältnis geringen Anzahl an Anlagen $\geq 1 \text{ MW}$ in Deutschland kommt es in den nachfolgenden Berechnungen für 1.-BlmSchV-Anlagen nur zu einer geringen Überschätzung in dieser Leistungsklasse. Als weitere Berechnungsgrundlage wurde größtenteils auf Daten zurückgegriffen, die während der Laufzeit des Projekts „qualiS“ (2015 bis 2017) durch das DBFZ erhoben wurden. Folglich sind alle nachfolgenden Ergebnisse, d.h. die Berechnungen zum leistungsklassenspezifischen Anlagenbestand, zur installierten Nennwärmeleistung und zu dem Verbrauch an Holzhackschnitzeln in Anlagen nach der 1. BlmSchV lediglich als grobe Schätzungen zu bewerten.

Um einen Überblick über die Leistungsklassen der in Deutschland installierten Hackschnitzelfeuerungen zu erhalten, wurde der Anlagenbestand durch das DBFZ im Rahmen des Projekts „qualiS“ mithilfe von Erstmessungsdaten des ZIV

aus dem Jahr 2011 in die Leistungsklassen $\leq 50 \text{ kW}$, $> 50 \text{ bis } \leq 100 \text{ kW}$, $> 100 \text{ bis } \leq 150 \text{ kW}$, $> 150 \text{ bis } \leq 500 \text{ kW}$ und $> 500 \text{ kW}$ unterteilt (Abbildung 3-2). Es zeigt sich, dass für 1.-BlmSchV-Anlagen insbesondere der Anteil von Kleinfeuerungsanlagen mit einer Nennwärmeleistung $\leq 100 \text{ kW}$ überwiegt. Diese finden bevorzugt in privaten Ein- und Mehrfamilienhäusern, aber auch in kleinen und mittleren Unternehmen oder kommunalen Einrichtungen Anwendung.

Eine umfangreiche Übersicht zu den aktuell am Markt verfügbaren Hackschnitzelheizungen mit Nennwärmeleistungen von 10 bis 10.000 kW liefert die FNR-Broschüre „Hackschnitzel-Heizungen Marktübersicht“ [3-2] sowie die dazugehörige Datenbank der FNR [3-3].

3.2 Brennstoffeinsatz in kleinen und mittleren Hackschnitzelfeuerungen

In Hackschnitzelfeuerungen $< 1 \text{ MW}$, welche nach den Vorgaben der 1. BlmSchV betrieben werden, dürfen ausschließlich Regelbrennstoffe nach § 3 der 1. BlmSchV (Brennstoff Nr. 4 und 5, siehe Abschnitt 2.2.2) eingesetzt werden. Insbesondere naturbelassenes Holz, z. B. Waldrestholz und chemisch unbehandelte Resthölzer aus der Säge- und Holzwerkstoffindustrie, ist hier zu nennen. Weiterhin wird zunehmend auf Holz aus dem Kurzumtrieb sowie aus der Landschaftspflege zurückgegriffen (vgl. Kapitel 6).

Nachstehend erfolgt die Berechnung des massenbezogenen Holzhackschnitzeinsatzes, entsprechend den fünf gewählten

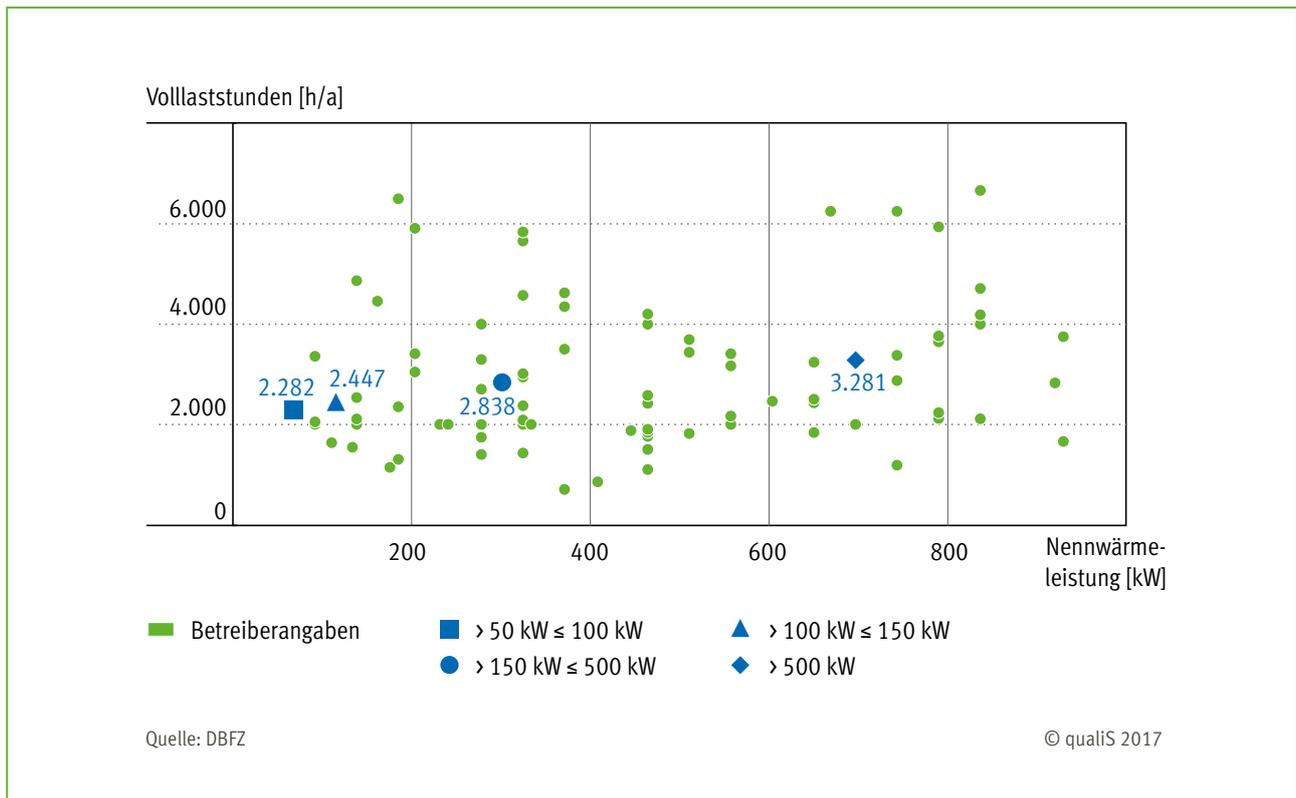


Abbildung 3.3: Mittlere Volllaststunden der Leistungsklassen ≤ 1 MW, $n = 85$ (berechnet anhand von Betreiberangaben aus der Heizwerke-Datenbank des DBFZ, 2015)

Leistungsklassen. Die Berechnung basiert im Wesentlichen auf:

- Auswertungen:
 - Anlagenbestand (Bezugsjahr 2020, siehe Abbildung 3.1),
 - Leistungsklassenverteilung (Bezugsjahr 2011, siehe Abbildung 3.2),
 - mittlere Volllaststunden bzgl. Leistungsklassen (Bezugsjahr 2015, siehe Abbildung 3.3),
 - mittlere Nennwärmeleistung bzgl. Leistungsklassen (Bezugsjahr 2014, siehe Abbildung 3.4),
- und Annahmen:
 - Jahresnutzungsgrad 80% (konstant, siehe [3-2]),
 - Heizwert 5,1 MWh/t (atro = absolut trocken) (gemittelt, siehe [3-2]).

Aufgrund teils veralteter Datensätze liefert diese Berechnungsmethode nur eine Annäherung an den tatsächlichen Holzhackschnitzeleinsatz in Feuerungsanlagen < 1 MW und ist lediglich als grober Schätzwert zu verstehen. So kann beispielsweise die tatsächliche Verteilung der Anlagen auf die einzelnen Leistungsklassen im Jahr 2020 von den im Projekt „qualiS“ berechneten Werten abweichen. Nicht zuletzt durch regional unterschiedliche sowie verbraucher- bzw. jahresspezifische Betriebsstunden der Hackschnitzelfeuerungen ist eine gewisse Streuung nicht auszuschließen. Abbildung 3.3 zeigt die mittleren Volllaststunden von Hackschnitzelfeuerungen pro Jahr (blaue Punkte), bezogen auf die Nennwärmeleistung der Anlage. Diese Angaben beruhen auf der Heizwerk-Datenbank des DBFZ (Stand der Berechnungen: 2015), wobei die Auswertung auf Betreiberangaben (grüne Punkte) zurückgehen, die bereits vor dem Start des Projekts „qualiS“ erhoben wurden. Abbildung 3.3 zeigt, dass

die leistungsklassenspezifischen Volllaststunden trotz großer Schwankungen zwischen den gemeldeten Betreiberdaten mit zunehmender Nennwärmeleistung ansteigen. In der untersten Leistungsklasse (≤ 50 kW) standen keine Datensätze zur Verfügung. Hier beziehen sich die weiterführenden Berechnungen auf einen Schätzwert von 2.000 Volllaststunden. Die leistungsklassenspezifische Nennwärmeleistung in den vier Klassen von ≤ 50 kW bis ≤ 500 kW ist in Abbildung 3.4 wiedergegeben (Stand 2014, Berechnung: DBFZ).

Unter Berücksichtigung der Annahmen zum Jahresnutzungsgrad von 80% sowie einem mittleren Heizwert von 5,1 MWh/t_{atro} [3-2] lässt sich der jährliche Holzhackschnitzelverbrauch wie folgt berechnen:

$$\frac{\text{Anlagenbestand} \times \varnothing \text{ Nennwärmeleistung} \times \text{Volllaststunden}}{\text{Jahresnutzungsgrad} \times \text{Heizwert}}$$

Insgesamt wurden im Jahr 2020 schätzungsweise 3,3 Mio. Tonnen (atro = absolut trocken) Holzhackschnitzel in 1.-BlmSchV-Anlagen energetisch verwertet. Bei einem Einsatz von ca. 1,5 Mio. Tonnen (atro) wurde annähernd die Hälfte der Brennstoffe in Feuerungen ≤ 150 kW verbrannt (siehe Tabelle 3.1). In Abbildung 3.5 ist die installierte Nennwärmeleistung der leistungsklassenspezifischen Verteilung dem jeweiligen Holzhackschnitzelverbrauch gegenübergestellt. Die unterschiedlichen Wertdifferenzen zwischen den Datenreihen begründen sich im Wesentlichen dadurch, dass mit steigender Leistung die Volllaststunden pro Jahr steigen.

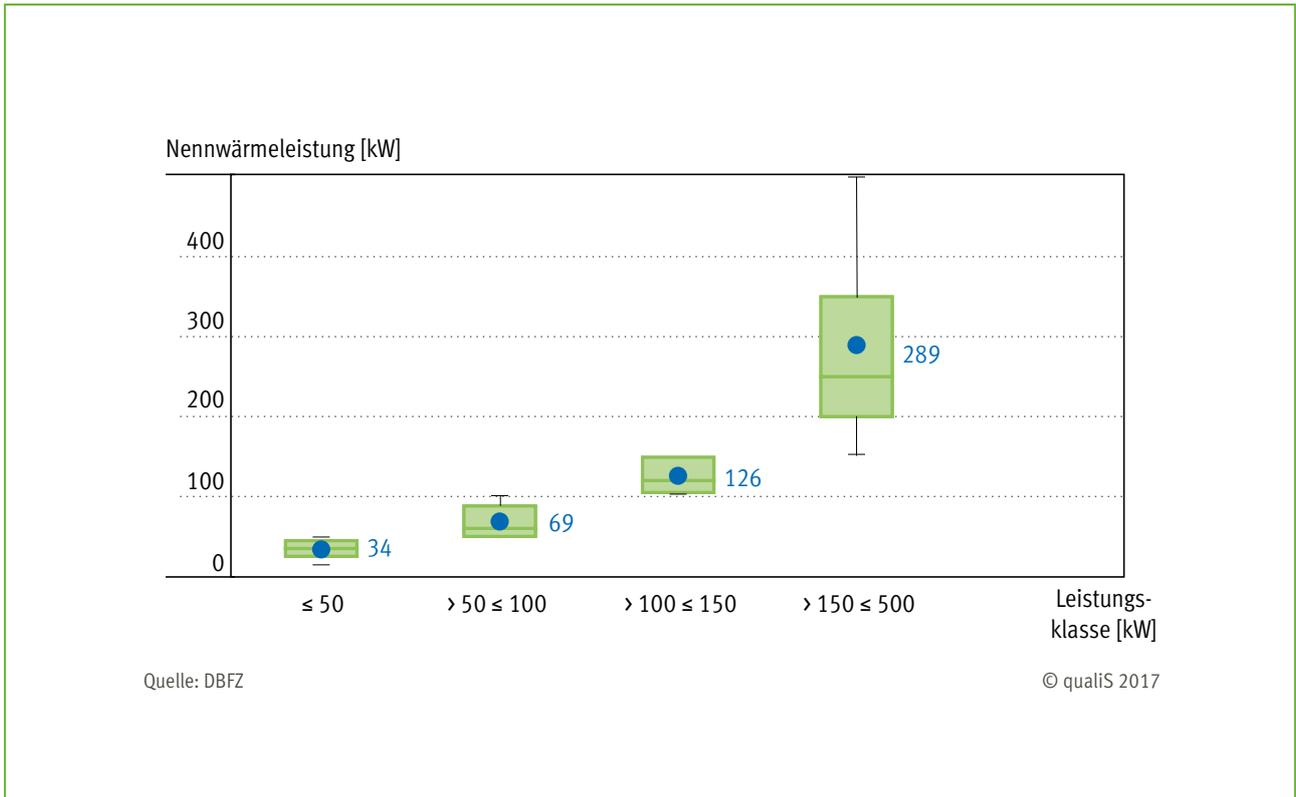


Abbildung 3.4: Mittlere Nennwärmeleistung der Leistungsklassen ≤ 500 kW, n = 4.528 Anlagen (berechnet aus Daten des ZIV, 2014)

Tabelle 3.1: Geschätzter Brennstoffeinsatz in Hackschnitzelfeuerungen < 1 MW (Anlagenbestand 2020, leistungsklassenspezifische Volllaststunden und Nennwärmeleistung, Jahresnutzungsgrad 80 %, Heizwert 5,1 MWh/t_{atro})

Leistungs-klasse [kW]	Nennwärmeleistung je Anlage ø [kW]	Installierte Hackschnitzelfeuerungen [Anzahl]	Installierte Nennwärmeleistung Σ [MW]	Durchschnittliche Volllaststunden ø [h/a]	HHS-Jahresbedarf ~ 2020 [t _{atro} /a]
≤ 50	34	39.854	1.355	2.000	664.227
> 50 ≤ 100	69	14.142	976	2.282	545.762
> 100 ≤ 150	126	3.857	486	2.447	291.455
> 150 ≤ 500	289	5.142	1.486	2.838	1.033.751
> 500 < 1.000	765	1.286	983	3.281	790.885
Summe		64.281	5.286		3.326.080

Mit sinkender Nennwärmeleistung der Feuerungsanlage verringert sich folglich der spezifische Jahresbedarf an Brennstoff. Abbildung 3.6 zeigt den spezifischen Holzhackschnitzelverbrauch in Tonnen (atro) je Jahr und kW Kesselleistung. Die Berechnungen beruhen zum einen auf den geschätzten Werten zum Brennstoffeinsatz aus dem Jahr 2015 (analog berechnet gemäß den Ausführungen zu Tabelle 3.1, grüne Datenpunkte) und zum anderen auf Betreiberangaben zu Beginn des Projektes „qualiS“, gemäß verwertbarer Datensätze der Heizwerke-Datenbank des DBFZ (blaue Datenpunkte). Zu sehen ist eine gewisse Streuung in den Betreiberdaten, welche u. a. auf unterschiedliche Betriebsjahre, Verbraucher, Jahresnutzungsgrade etc. zurückzuführen ist. Dennoch bestätigen die Betreiberangaben aus der Heizwerk-Datenbank des DBFZ den steigenden Trend der berechneten Werte.

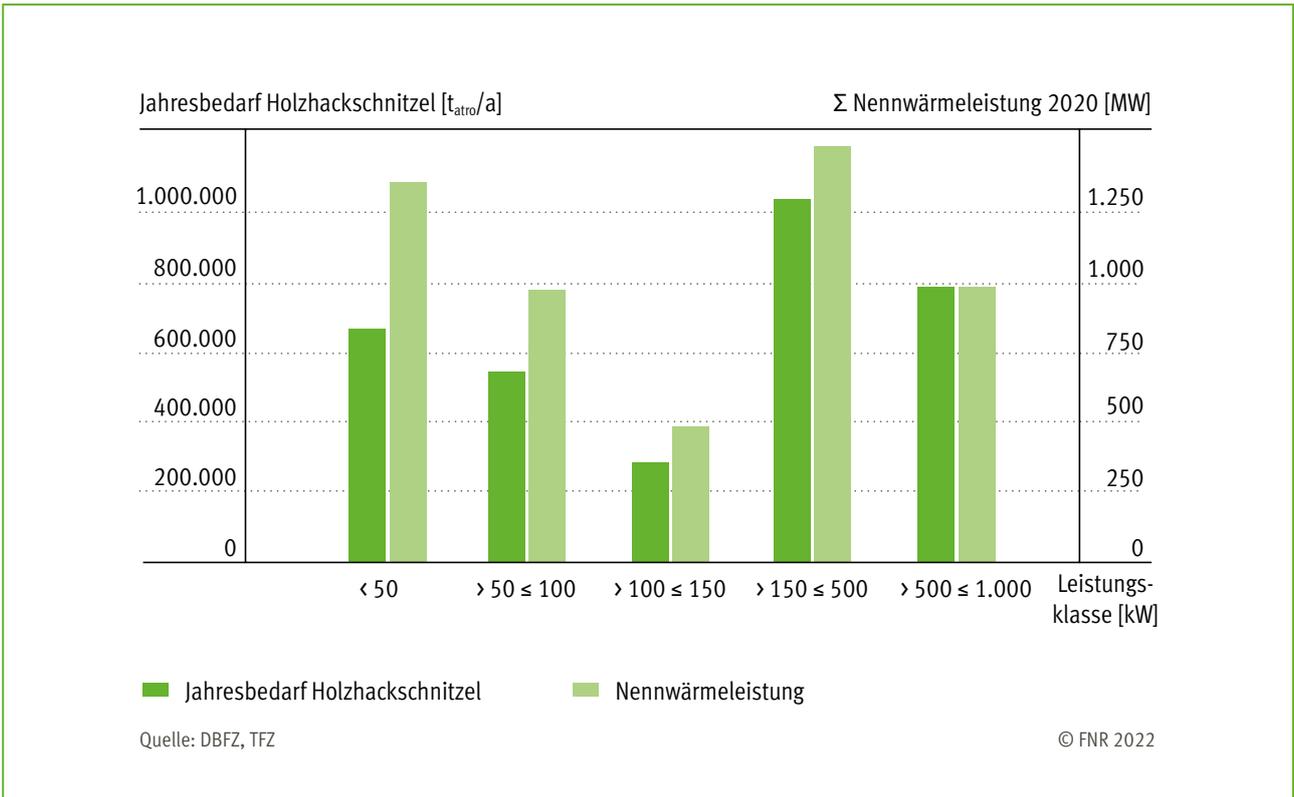


Abbildung 3.5: Jahresbedarf (2020) an Holz hackschnitzeln und installierte Nennwärmeleistung von Holz hackschnitzelkesseln im Geltungsbereich der 1. BImSchV

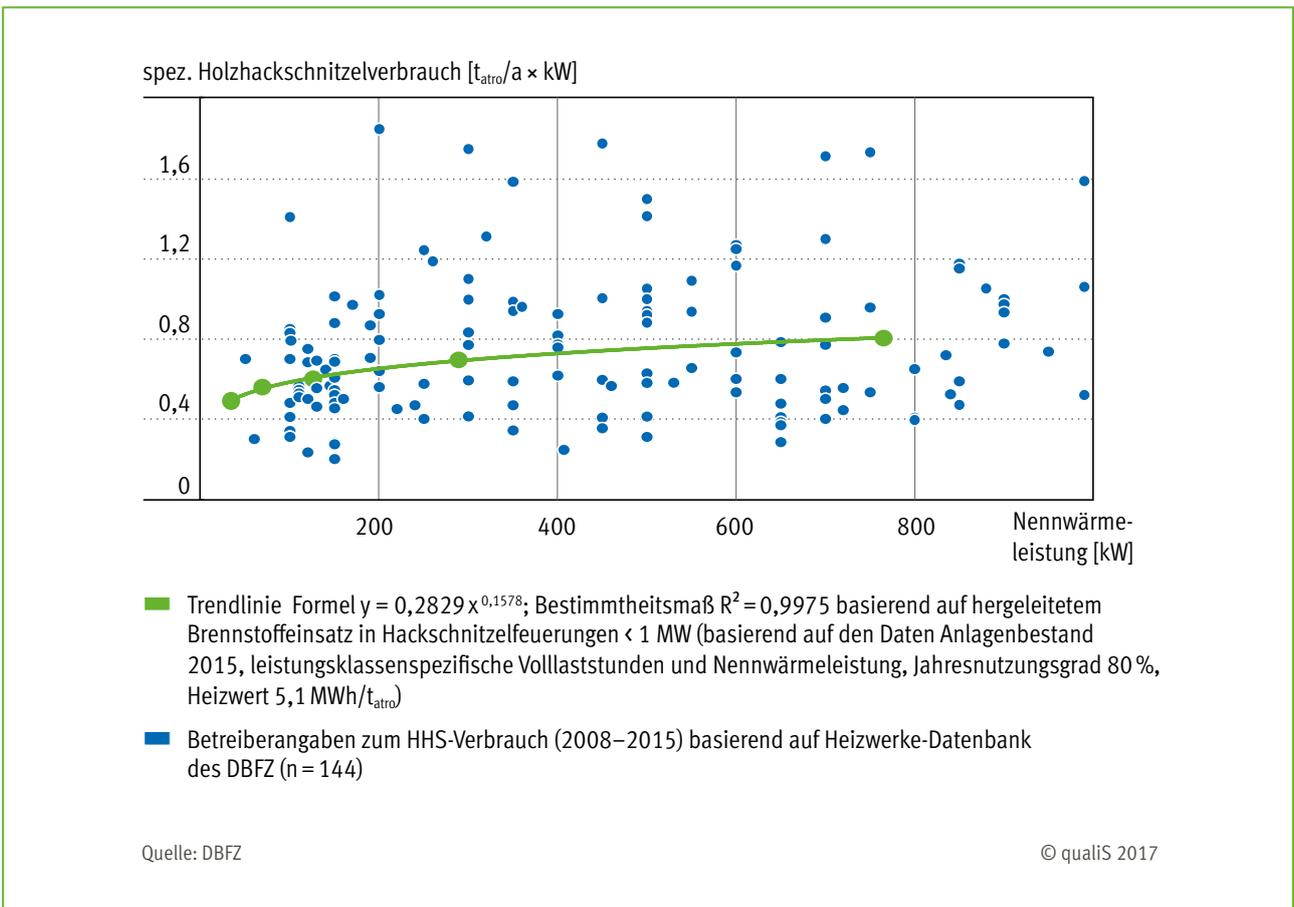


Abbildung 3.6: Spezifischer Holz hackschnitzelverbrauch in $t_{atro}/(a \times kW)$ (grün: n = 5, blau: n = 144 [3-5])

3.3 Investitionskosten von Hackschnitzelheizungsanlagen

Im Vergleich zu Öl- oder Gasheizungen liegen die Investitionskosten für Hackschnitzelheizungen deutlich höher. Nach aktuellen Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen des Technologie und Förderzentrums im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ) aus dem Jahr 2020 entfallen ca. 63 % der Investitionskosten für eine Hackschnitzelheizung mit einer Nennwärmeleistung von 30 kW auf den Kessel mit Steuerung und Regelung, weitere 6 % auf den Pufferspeicher, 18 % auf Peripherieteile und 13 % auf die Montage [3-4].

Die Kosten für eine Hackschnitzelheizung hängen dabei direkt von der zu installierenden Leistung ab. In Abbildung 3.7 sind spezifische Investitionskosten für Hackschnitzelfeuerungen mit Nennwärmeleistungen von 11 bis 1.000 kW aus dem Bezugsjahr 2017 dargestellt. Die Investitionskosten gründen vorrangig auf einer Auswertung der Marktübersicht von Hackschnitzelheizungen der FNR [3-2] und wurden auf Basis von Recherchen seitens des DBFZ ergänzt. Trotz einer gewissen Streuung und Alter der Daten sieht man deutlich, dass die spezifischen Investitionskosten mit zunehmender Anlagenleistung deutlich sinken. Gleiches gilt für die spezifischen Investitionskosten von Partikelabscheidern. Letztere sind seit Einführung der Stufe 2 der 1. BImSchV im Jahr 2015 in ihrer Anschaffung jedoch deutlich günstiger geworden und durch geeignete Förderprogramme wie die „Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG EM)“ i. d. R. gedeckt (vgl. Kapitel 2).

Um die tatsächliche Wirtschaftlichkeit von Hackschnitzelheizungen im Vergleich zu anderen Heizsystemen im Einzelfall korrekt bewerten zu können, sind fallspezifische Berechnungen durchzuführen. Dabei müssen neben den Gegebenheiten vor Ort u. a. auch aktuelle Förderprogramme (z. B. BEG EM, siehe Kapitel 2) berücksichtigt werden, wodurch Investitionskosten deutlich gesenkt werden. Zudem üben sich die teils deutlich niedrigeren Brennstoffpreise für Holzhack schnitzeln im Vergleich zu Heizöl oder Erdgas (jeweils bezogen auf MWh) über die Lebensdauer der Anlage positiv auf deren Wirtschaftlichkeit aus.

3.4 Preisentwicklung bei Holzhack schnitzeln

Ein wesentlicher Faktor für die Wirtschaftlichkeit von Heizanlagen sind die Kosten für die eingesetzten Brennstoffe. Dabei sind Holzbrennstoffe bezogen auf die bereitgestellte Energie in MWh günstiger als fossile Brennstoffe. Zudem fluktuieren die Brennstoffpreise von Holzbrennstoffen deutlich weniger als beispielsweise der Preis für Heizöl, wodurch sich für die Betreiber einer Holzheizung eine größere Planbarkeit ergibt.

Abbildung 3.10 gibt die Entwicklung des Verkaufspreises für Holzhack schnitzeln der Jahre 2005 bis 2021 wieder. Die Abbildung generiert sich auf Basis zweier öffentlich zugänglicher Literaturquellen und zeigt Jahresdurchschnittspreise für Holzhack schnitzeln unterschiedlicher Sortimente in € pro t_{atmo} bzw. den Erzeugerpreisindex des Statistischen Bundesamtes in Prozent. Die Daten werden monatlich bzw. quartalsweise veröf-

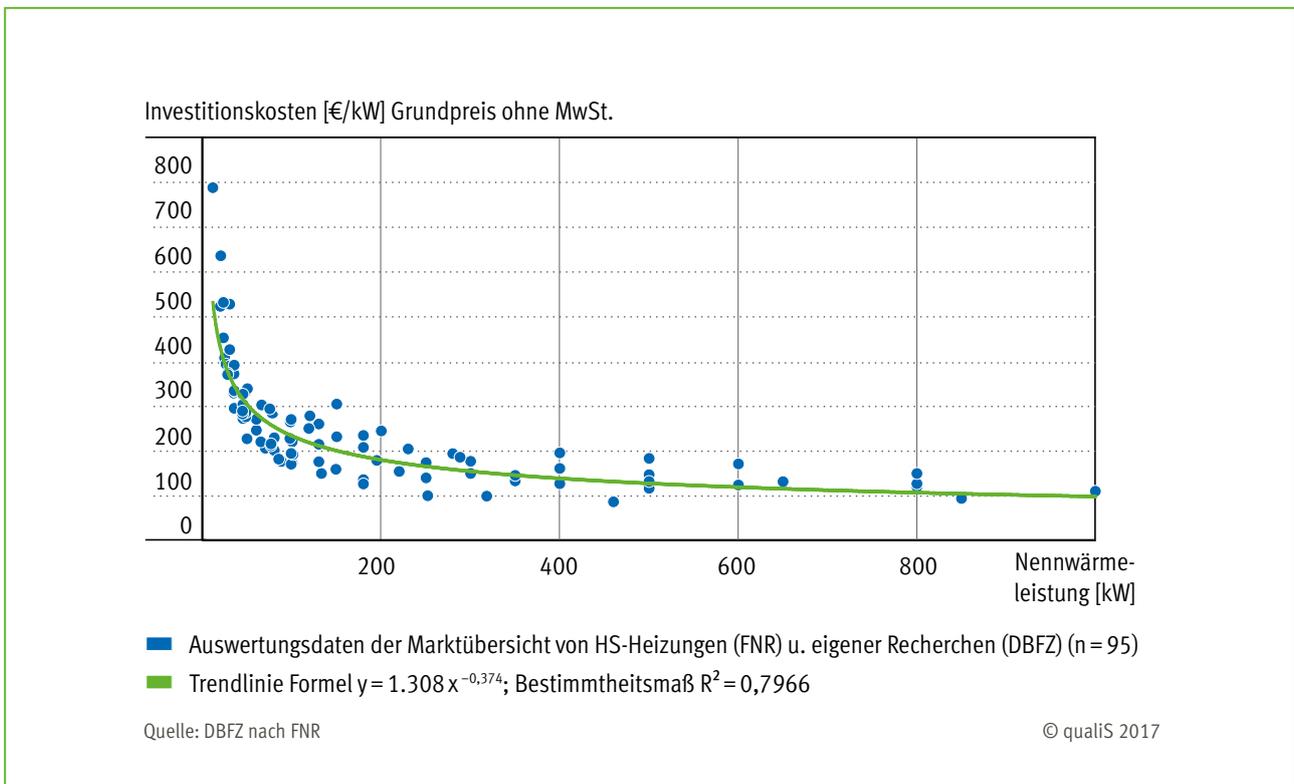


Abbildung 3.7: Spezifische Investitionskosten von Hackschnitzelfeuerungen, n = 95 (Bezugsjahr der Berechnung: 2016) [3-2]

fentlicht und beinhalten zudem detailliertere Angaben zu regionalen Preisunterschieden, getrennt nach Nord und Süd (Preisindex von C.A.R.M.E.N. e.V., hier nicht dargestellt).

- C.A.R.M.E.N e.V. [3-5]:
 - Wassergehalt (M) = 20 m-%: Lieferung von 30 Schütt-raummetern mit einem Wassergehalt von 20 m-% im Umkreis von 20 km
 - Wassergehalt (M) = 35 m-%: Lieferung von 80 Schütt-raummetern mit einem Wassergehalt von 35 m-% im Umkreis von 20 km
- Statistisches Bundesamt [3-6]:
 - Erzeugerpreisindex „Holz in Form von Plättchen oder Schnitzeln (ohne Waldhackschnitzel)“

Die Angaben zur Preisentwicklung von Holzhackschnitzeln belegen eine Preissteigerung der Brennstoffe bis zum Jahr 2010, relativ stabile Verkaufspreise in den Jahren 2010 bis 2015, gefolgt von einer Abnahme der Preise in den letzten fünf Jahren. Aufgrund regionaler Unterschiede sowie unterschiedlicher Ansprüche an die Brennstoffqualität, des energie- bzw. massenbezogenen Umfangs der Lieferaufträge und der Lieferdistanz zwischen Händler und Kunden können die dargestellten Durchschnittswerte jedoch nur als grober Richtwert für den tatsächlichen Holzhackschnitzelpreis verwendet werden.

3.5 Zusammenfassung

In dem hier vorliegenden Kapitel konnte der Anlagenbestand und der Brennstoffeinsatz in kleinen und mittleren Hackschnitzelfeuerungen abgeschätzt werden. Anhand der Auswertung der Messergebnisse des ZIV wird der Bestand von Hackschnitzelfeuerungen < 1 MW im Jahr 2020 auf 64.280 Anlagen geschätzt. Die geschätzte Nennwärmeleistung beträgt ca. 5,29 MW. Weiterführend konnten der Anlagenbestand und die Nennwärmeleistung verschiedener Leistungsklassen gegenübergestellt werden.

Basierend auf den Zahlen zum Anlagenbestand und den entsprechend summierten Nennwärmeleistungen sowie auf Grundlage zusätzlicher Annahmen zur Betriebsweise der Hackschnitzelfeuerungen konnte der Brennstoffeinsatz im Jahr 2020 leistungsklassenspezifisch taxiert werden. Demnach wurden im Jahr 2020 insgesamt ca. 3,3 Mio. Tonnen (atro) Holzhackschnitzeln in 1.-BlmSchV-Anlagen energetisch verwertet.

Die in diesem Kapitel dargestellten Übersichten zu den Holzhackschnitzelpreisen sowie zu den spezifischen Investitionskosten von Hackschnitzelfeuerungen sollen im Wesentlichen Vergleichswerte liefern und auf verfügbare Quellen hinweisen. Für den Neubau einer Hackschnitzelheizung oder bei einer wesentlichen Änderung an einer bestehenden Feuerung empfiehlt sich eine fallspezifische Beratung durch geschultes Personal. Weitere Informationen finden sich in der FNR-Broschüre „Hackschnitzelheizungen – Was muss beachtet werden?“ [3-7].

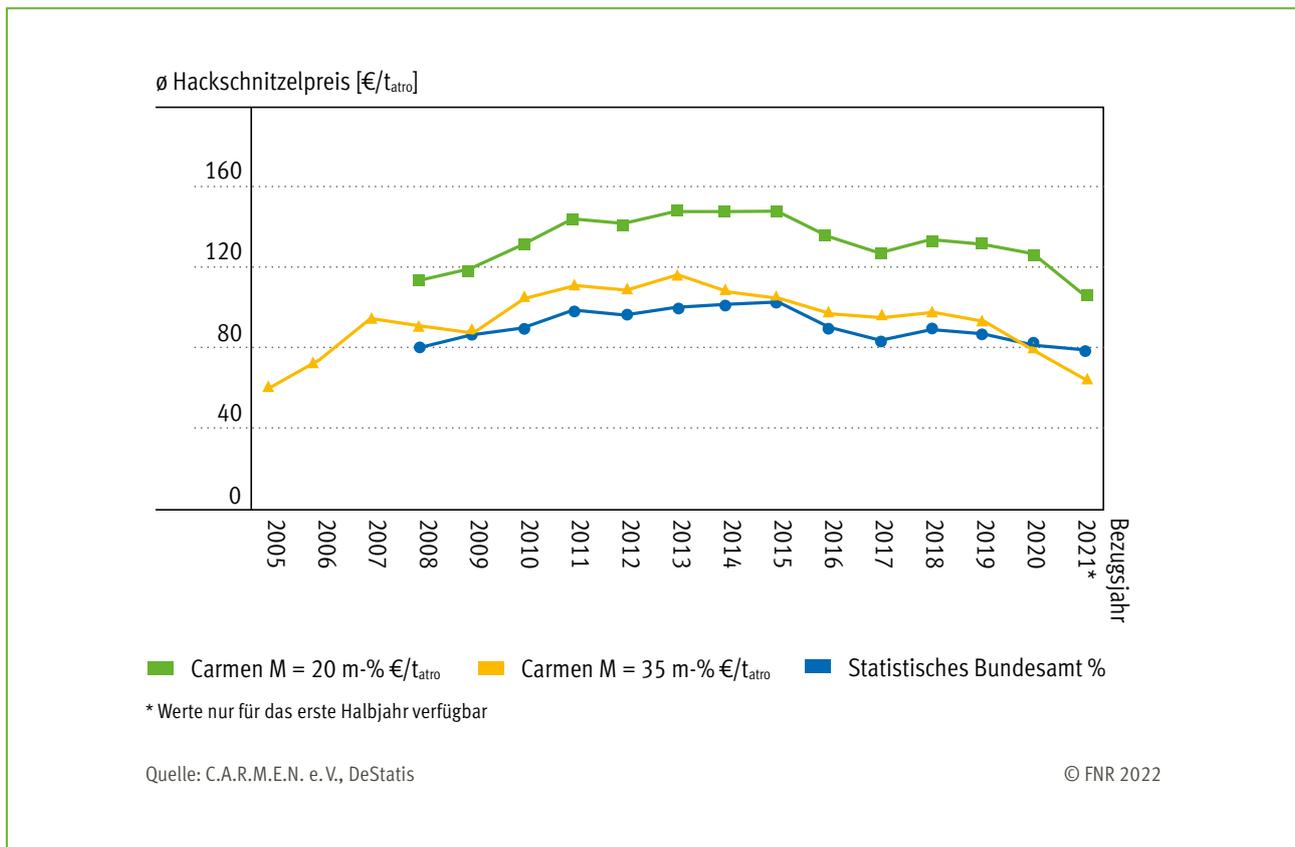


Abbildung 3.8: Preisentwicklung diverser Holzhackschnitzelsortimente nach Auswertung der Angaben von C.A.R.M.E.N. e.V. [3-5] und des Statistischen Bundesamts [3-6]

4 STRUKTUREN DER HACKSCHNITZELPRODUZENTEN UND NACHFRAGE NACH QUALITATIV HOCHWERTIGEN HOLZHACKSCHNITZELN

Nachstehende Aussagen basieren auf Auswertungen einer bundesweiten Umfrage aus dem Jahr 2015 zur sekundären Aufbereitung und Zertifizierung von qualitativ hochwertigen Holzhackschnitzeln. Die Online-Befragung richtete sich an Hackschnitzelproduzenten sowie -aufbereiter und -händler. Sie war eine Kooperation zwischen folgenden Instituten:

- Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF)
- DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH
- Deutsches Pelletinstitut GmbH (DEPI)
- Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ)

Insgesamt wurden 954 potenzielle Teilnehmer recherchiert und ein Anschreiben – mit Verweis auf den Link der Umfrage – direkt per E-Mail bzw. postalisch an 886 Adressen versendet. Außerdem wurde der Link zur Umfrage auf verschiedene Homepages gestellt und über Newsletter Dritter verteilt. Neben den allgemeinen Strukturen der Hackschnitzelproduzenten beinhaltete die Befragung relevante Themen zur Bereitstellung, Aufbereitung, zum Verkauf und zur Einschätzung der zukünftigen Nachfrage von qualitativ hochwertigen Holzhackschnitzeln. Insgesamt wurden 83 Fragen gestellt, welche in einem Zeitraum von ca. 9 Wochen – bis zum 12. Januar 2016 – von 122 Teilnehmern vollständig oder teilweise beantwortet wurden. Letztendlich standen 91 Datensätze für eine repräsentative Auswertung zur Verfügung.

Im Rahmen der Umfrage wurden die Produzenten, Aufbereiter und Händler neben Fragen zur eigenen Betriebs- und Kundenstruktur u. a. auch zu den Aufbereitungstechniken und -schritten zweier Sortimente befragt. Detaillierte Aussagen zur Brennstoffaufbereitung können Kapitel 7 entnommen werden.

4.1 Allgemeine Strukturen der Hackschnitzelproduzenten

Eingangs der Befragung wurden die Hackschnitzelproduzenten, -aufbereiter und -händler nach ihrer Betriebsstruktur und ihrem Absatz an Holzhackschnitzeln im Betriebsjahr 2014 gefragt. Hierdurch konnten stellenweise direkte Zusammenhänge

zwischen Holzhackschnitzelmenge und anderen relevanten Betriebsparametern dargestellt werden.

In Abbildung 4.1 ist die Anzahl der benötigten Vollzeitkräfte für die Holzhackschnitzelaufbereitung dargestellt. Bei annähernd 85 % der hierbei verwertbaren Rückläufe waren bis zu 5 Personen mit der Hackschnitzelaufbereitung beschäftigt. Kleine Unternehmen mit nur einer Vollzeitstelle waren mit 45 % am häufigsten vertreten. Diese Ein-Personen-Unternehmen bereiteten im Mittel ca. 2.400 Tonnen (atro) Holzhackschnitzel im Jahr auf.

4.1.1 Vermarktung von Holzhackschnitzeln nach den Brennstoffspezifikationen der DIN EN ISO 17225-4 und weiterer Normen

Die Spezifikation von Holzhackschnitzeln für die Verwendung in Kleinf Feuerungsanlagen sollte gemäß DIN EN ISO 17225-4 erfolgen. Diese internationale Norm ersetzt seit 2014 die bis dahin gültige DIN EN 14961-4 sowie die in der Praxis noch häufig verwendete ÖNorm M7133 (siehe Kapitel 5). Im Jahr 2021 wurde die DIN EN ISO 17225-4 überarbeitet, wobei die Partikelgrößenklassen und einige weitere Qualitätsparameter praxisnäher angepasst wurden (vgl. Kapitel 5). Somit ist die DIN EN ISO 17225-4 die aktuell gültige Norm für die Klassifizierung von Holzhackschnitzeln.

Grundsätzlich gilt, dass die Verwendung der DIN EN ISO 17225-4 freiwillig und nicht gesetzlich bindend ist. Ihre Anwendung bietet jedoch einige Vorteile für alle am Brennstoffhandel und Brennstoffeinsatz Beteiligten. Durch einheitliche Qualitätsstandards vereinfacht sich u. a. der Austausch zwischen den Akteuren. So kann sich die Kesselindustrie hinsichtlich der für den jeweiligen Kessel benötigten Brennstoffqualität direkt auf die aktuelle Norm beziehen. Hackschnitzelproduzenten können wiederum unterschiedliche Sortimente mit Normbezug herstellen und vermarkten. Betreiber einer Hackschnitzelfeuerung sind in der Lage, die für sie relevanten Sortimente am Markt zu erwerben und deren Preise zu vergleichen.

Abbildung 4.2 zeigt die Antworten der Hackschnitzelproduzenten auf die Frage: „Auf Basis welcher Norm legen Sie die Eigenschaften der Holzhackschnitzel fest?“ Gemäß den Aussagen der Produzenten nahmen 40 % Bezug auf eine der genannten Normen. Nur lediglich 10 % bezogen sich im Jahr 2015

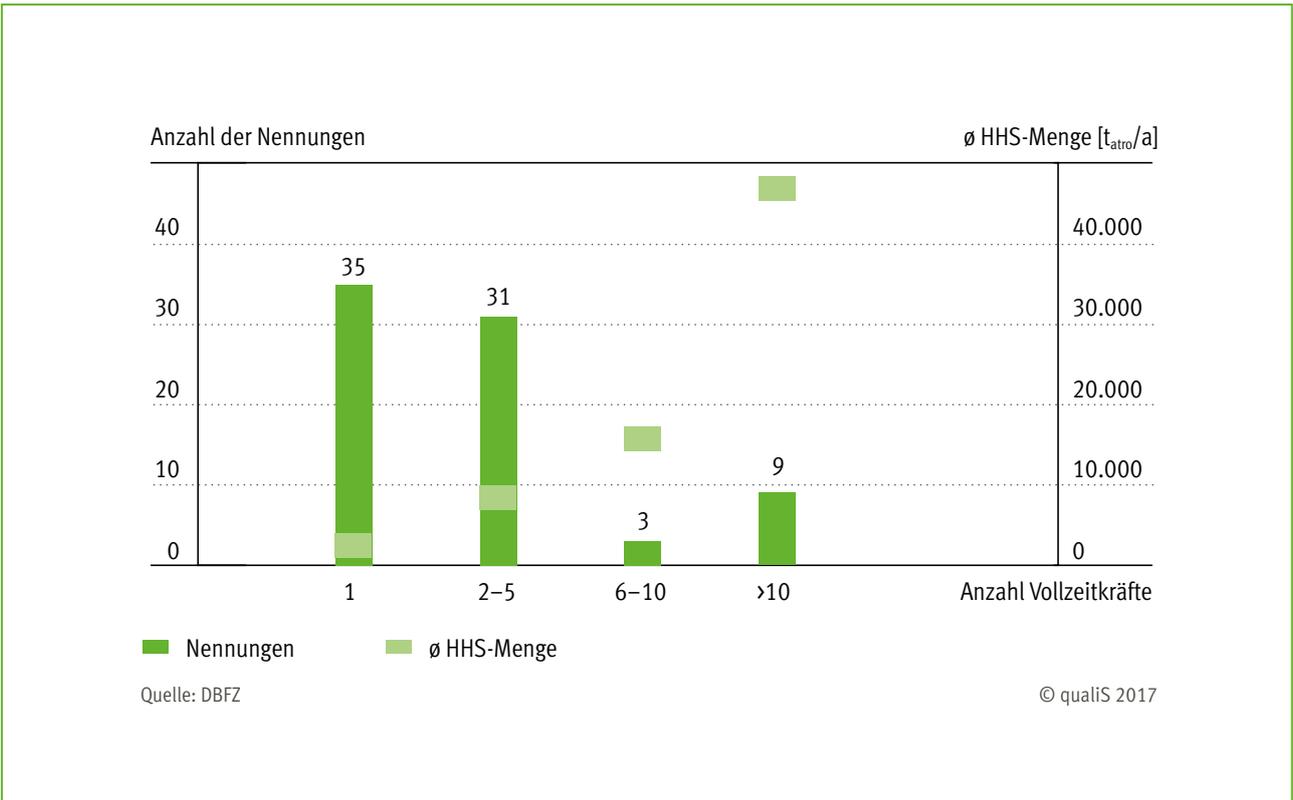


Abbildung 4.1: Anzahl der Vollzeitkräfte für die Hackschnitzelaufbereitung, n = 78

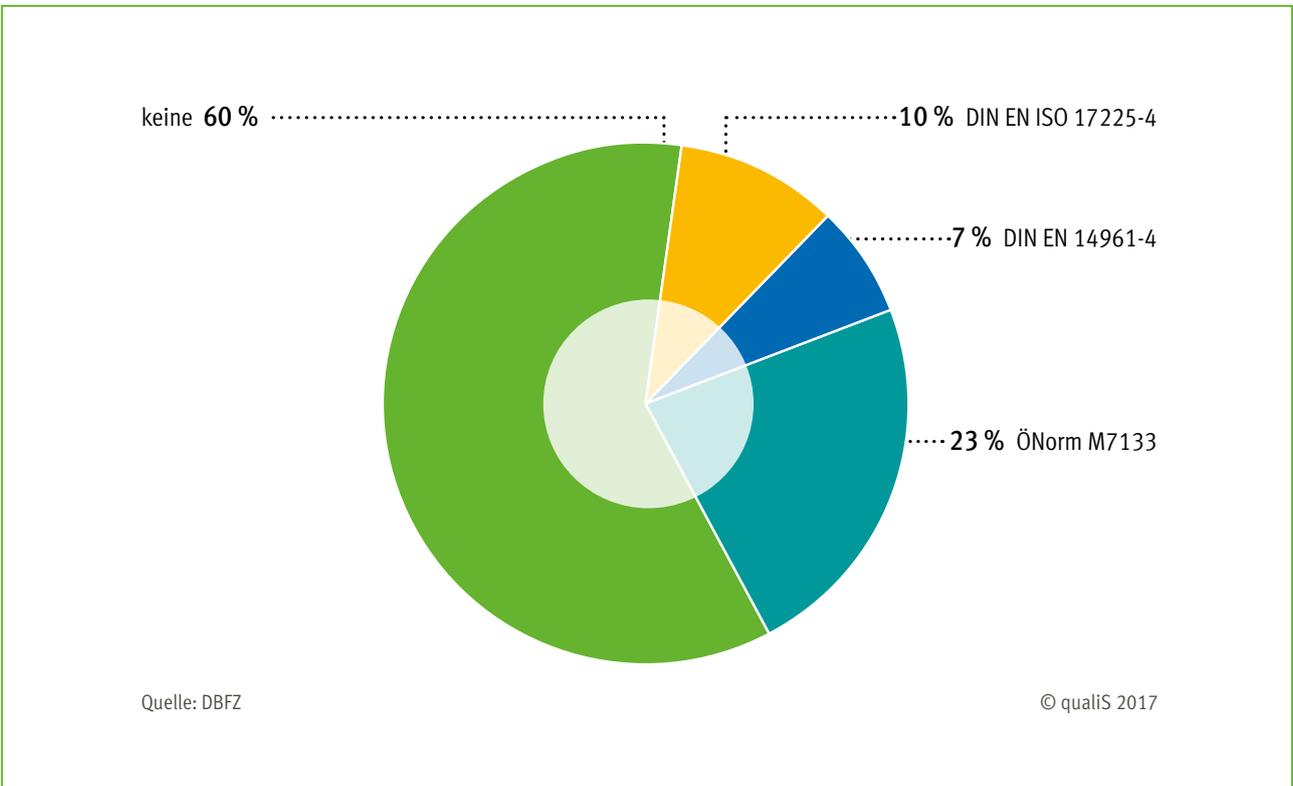


Abbildung 4.2: Vermarktung der Holz hackschnitzel nach den Brennstoffspezifikationen, n = 85

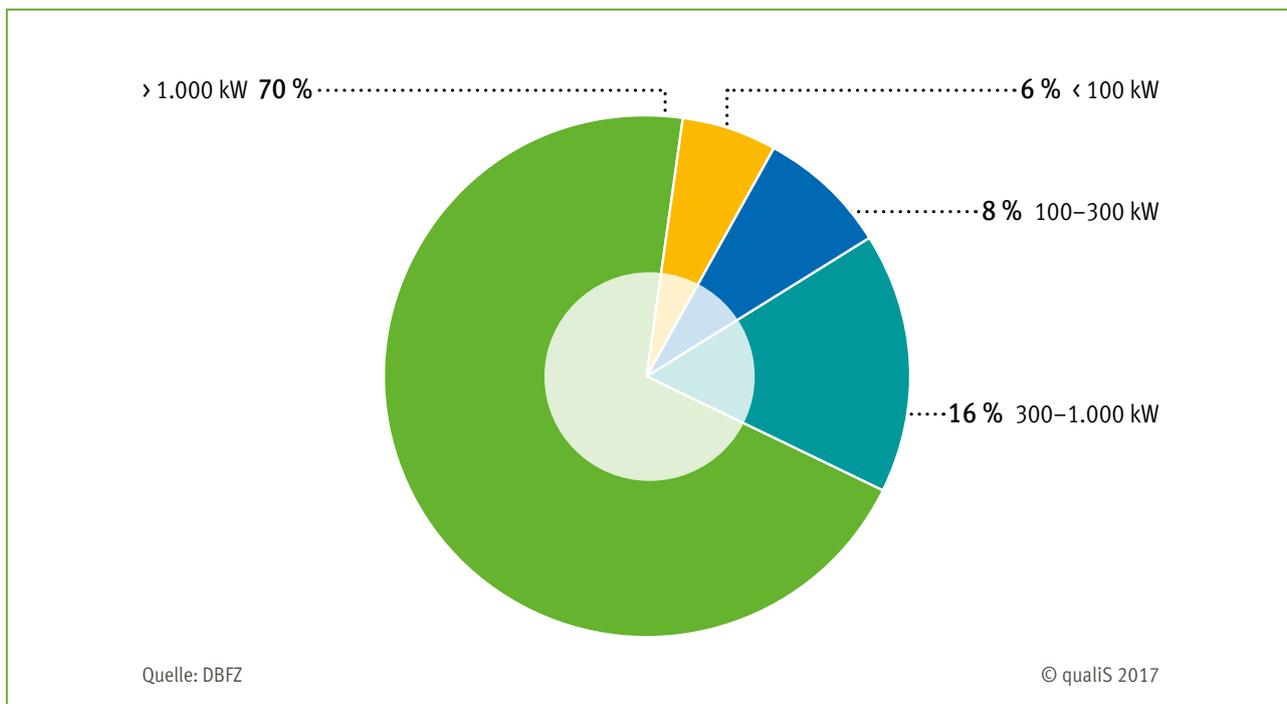


Abbildung 4.3: Hackschnitzelabnehmer nach Anlagenleistung, bezogen auf die HHS-Abnahmemenge im Jahr 2014, n = 68

bereits auf die aktuell gültige DIN EN ISO 17225-4. Der Großteil der Befragten legte die Eigenschaften der Holzhackschnitzel nach einer der veralteten Normen oder ohne Normbezug fest. In letzterem Fall vermarkteten die Produzenten und Händler die Brennstoffe nach eigenen Qualitätskriterien oder stellten die Holzhackschnitzel nach den jeweiligen Anforderungen der Kunden bereit. Vor allem Letzteres gilt möglicherweise vermehrt für Kunden mit Anlagen > 1 MW, für die die Spezifikationen der DIN EN ISO 17225-4 meist zu streng ausgelegt sind. Hier kann die 2021 veröffentlichte DIN EN ISO 17225-9 „Klassifizierung von grobem Schredderholz und Holzhackschnitzeln für die industrielle Verwendung“ angewendet werden.

4.1.2 Identifizierung der Abnehmer von Holzhackschnitzeln

Nachfolgende Betrachtungen geben Aufschluss über die Abnehmer von Holzhackschnitzeln, wobei sich hier die Aussagen auf die jährlich vermarktete Holzhackschnitzelmenge beziehen. In der Befragung wurde dies durch eine prozentuale Verteilung der Antwortmöglichkeiten realisiert.

Abbildung 4.3 zeigt die Holzhackschnitzelabnahme im Jahr 2014 hinsichtlich unterschiedlicher Nennwärmeleistungsbereiche der Kunden. Die Hauptmenge der Holzhackschnitzel aus der Befragung wurde demnach vorrangig für die thermische Verwertung in Großfeuerungsanlagen verwendet. Allerdings bedienen die meisten Produzenten alle genannten Leistungsklassen. Lediglich drei Produzenten lieferten nur an Kunden mit Anlagen < 100 kW und sechs Produzenten nur an Betreiber von Feuerungsanlagen > 1 MW. Demzufolge sind nachstehende Textpassagen – bei denen sich die Verteilung vorrangig auf die Anzahl der Nennung bezieht – in demselben Maße für 1.-BlmSchV-Anlagen relevant.

Weiterführend wurde nach der Betreiberstruktur der Hackschnitzelabnehmer gefragt. Abbildung 4.4 zeigt, dass 80,2% der Holzhackschnitzel in gewerblichen Betrieben thermisch verwertet wurden. Auch hier vermarkteten die meisten Produzenten an alle gelisteten Betriebsstrukturen und nur sechs ausschließlich an Gewerbebetriebe.

4.1.3 Anzahl vermarkteter Hackschnitzelsortimente

Nachstehende Ausführungen sollen ausschließlich einen Überblick zur Anzahl bereitgestellter Holzhackschnitzelsortimente liefern. Entsprechend Abbildung 4.5 gaben insgesamt 78 Hackschnitzelproduzenten (ca. 85,7 %) an, bis zu vier Sortimente zu vermarkten. Generell ist zu erkennen, dass sich die mittlere abgesetzte Holzhackschnitzelmenge mit steigender Sortimentsvielfalt erhöhte.

4.1.4 Bezug des Ausgangsmaterials für die Hackschnitzelbereitstellung

Die vermarkteten Holzhackschnitzel setzten sich bei einem Großteil der im Jahr 2015 befragten Anbieter aus diversen Ausgangsmaterialien zusammen. Zu nennen sind hier insbesondere Sortimente aus Waldrest-, Energierund-, Landschaftspflege- und Sägereestholz.

Abbildung 4.6 gibt den Umkreis (in km) wieder, aus welchem das Ausgangsmaterial von den Hackschnitzelproduzenten bezogen wird. Nach den verwertbaren Rückläufen der Umfrage bezogen drei Viertel der Holzhackschnitzelproduzenten ihr Ausgangsmaterial im direkten Umkreis bis 50 Kilometer. Dies spricht für eine regionale Verfügbarkeit des Brennstoffs Holzhackschnitzel, was neben ökologischen auch ökonomische Vorteile bietet.

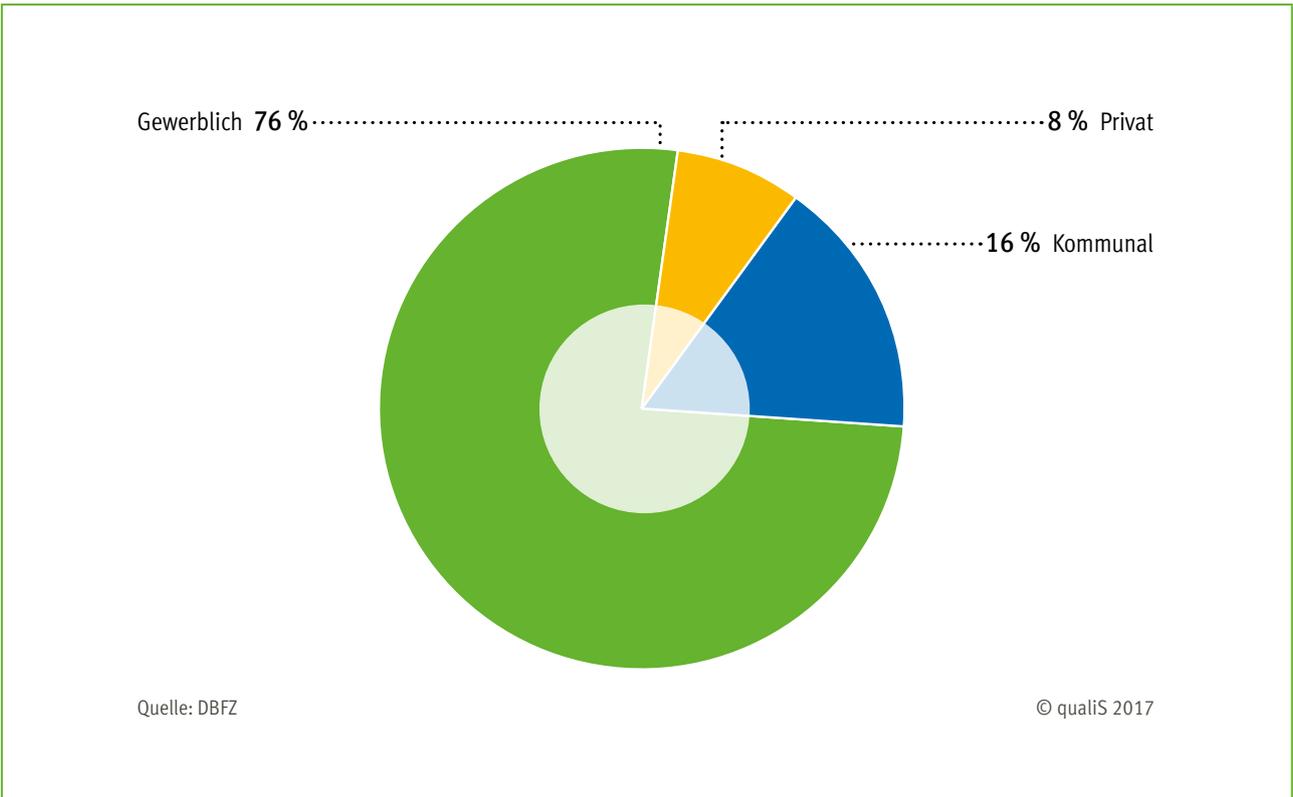


Abbildung 4.4: Hackschnitzelabnehmer nach Betreiberstruktur, bezogen auf die HHS-Abnahmemenge im Jahr 2014, n = 73

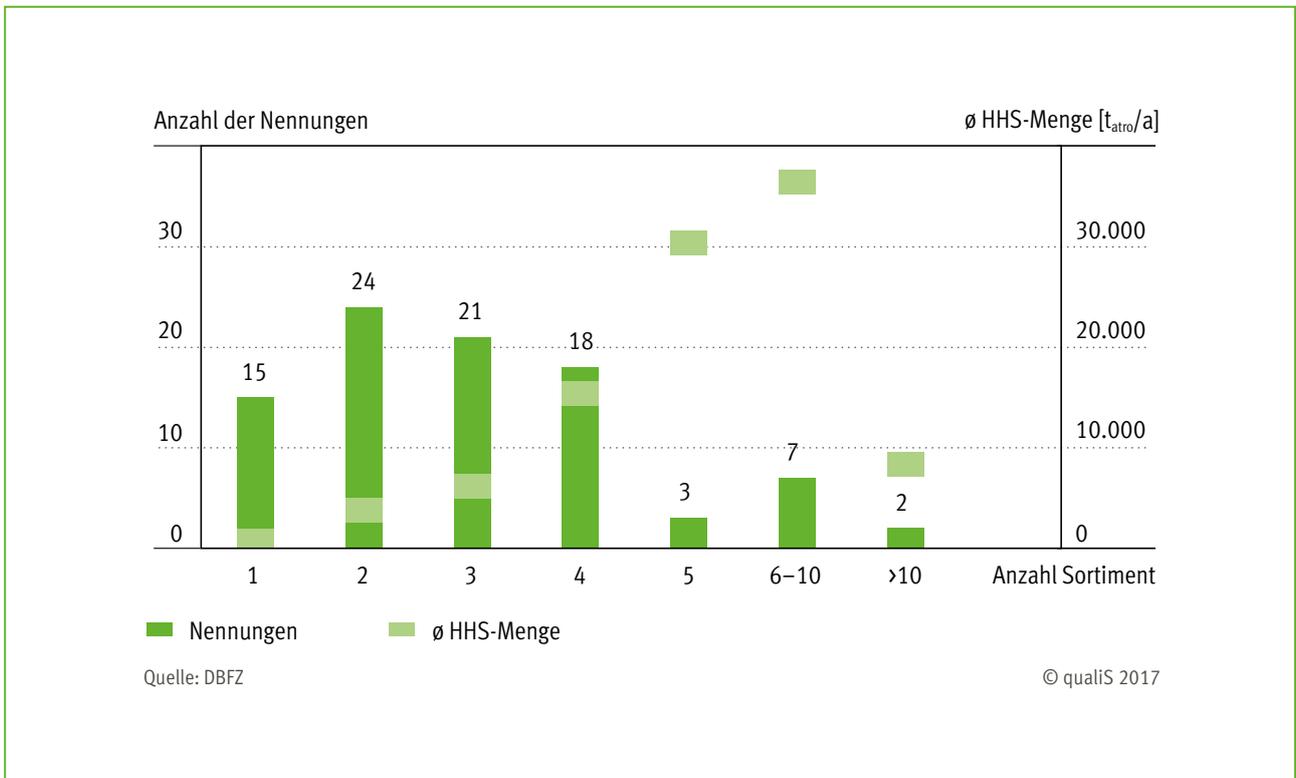


Abbildung 4.5: Anzahl vermarkteter Holz hackschnitzelsortimente, n = 90

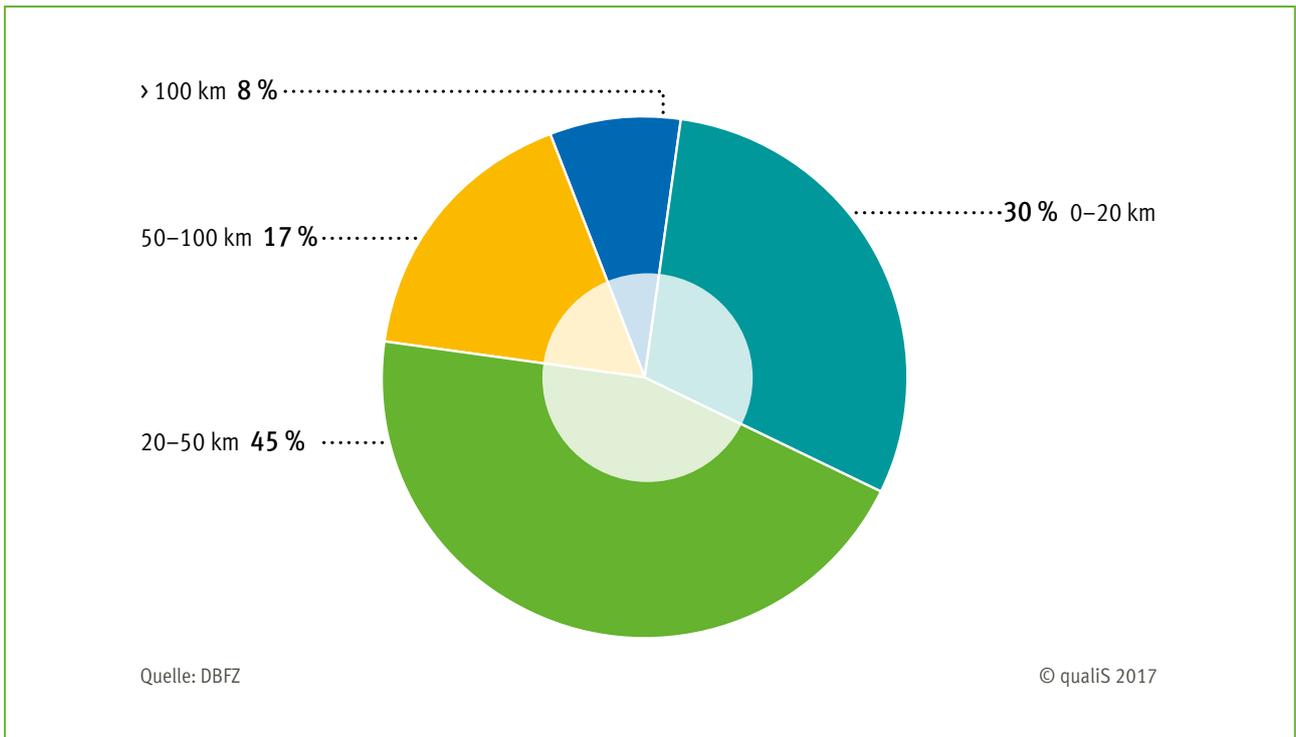


Abbildung 4.6: Transportentfernung des Ausgangsmaterials für die HHS-Bereitstellung, n = 86

4.2 Nachfrage und Bedarf an qualitativ hochwertigen Holzhackschnitzeln

Qualitativ hochwertige Holzhackschnitzel weisen zum einen höhere Energiedichten und eine verbesserte Lagerfähigkeit gegenüber minderwertigeren Sortimenten auf. Zum anderen kann sich der Einsatz von Holzhackschnitzeln im höheren Qualitätssegment auch positiv auf Emissionsverhalten, Betriebsweise und Verschleiß der Feuerungsanlage auswirken (vgl. Kapitel 8). Insbesondere eine gleichbleibend hohe Qualität gewährleistet eine effiziente und saubere Verbrennung bei geringem Wartungs- und Reinigungsaufwand.

Mit Bezug auf positive Effekte qualitativ hochwertiger Holzhackschnitzel auf das Emissionsverhalten wurden die Hackschnitzelproduzenten nach erstmals im Jahr 2015 aufgetretenen Neukunden – explizit ausgewiesen war hier das Datum des Inkrafttretens der Stufe 2 der 1. BImSchV – gefragt, die höhere Anforderungen an die Holzhackschnitzelqualitäten stellten. Aus Abbildung 4.7 geht hervor, dass 21 Teilnehmer diese Frage bejahten. Folglich bestand bei knapp einem Drittel der Hackschnitzelproduzenten eine gestiegene Nachfrage nach einem Brennstoff im höheren Qualitätssegment. Gleichzeitig bewerten diese sowohl das zukünftige Interesse an der Herstellung von qualitativ hochwertigen Holzhackschnitzeln als auch die Zahlungsbereitschaft der Kunden für dieses Segment im Mittel höher.

Im Rahmen einer separat durchgeführten Umfrage wurden 28 Kesselhersteller aus Deutschland und Österreich gefragt, ob das Inkrafttreten der Stufe 2 der 1. BImSchV zu einem gesteigerten Interesse an Qualitätshackschnitzeln geführt hat. Diesbezüglich konnten acht Rückläufe einbezogen werden, von denen lediglich ein Hersteller ein gesteigertes Interesse bestätigte. Ähnlich

schätzten diese acht Hersteller das zukünftige Interesse ein. Hier vermuteten insgesamt nur zwei Kesselhersteller ein gesteigertes Interesse.

Ferner wurden auch die Hackschnitzelproduzenten nach ihrer Einschätzung bezüglich zukünftiger Nachfrage an Holzhackschnitzeln im höheren Qualitätssegment befragt. Abbildung 4.8 belegt, dass die Produzenten einen gewissen Nachfrageanstieg über alle Leistungsklassen hinweg erwarten, wobei das Marktpotenzial qualitativ hochwertiger Holzhackschnitzel vornehmlich im Bereich kleiner Anlagen – mit Nennwärmeleistungen bis 300 kW – am höchsten erscheint.

4.3 Zusammenfassung

Auf Basis der Online-Befragung zur Betriebsstruktur von Brennstoffproduzenten, -aufbereitern und -händlern, welche Fragen zu der vor Ort durchgeführten sekundären Brennstoffaufbereitung von qualitativ hochwertigen Holzhackschnitzeln (siehe Kapitel 7) und zur Anwendung aktueller Brennstoffnormen beinhaltete, konnten sowohl allgemeine Strukturen der Hackschnitzelproduzenten als auch charakteristische Merkmale der Hackschnitzelabnehmer dargestellt werden. Die Ergebnisse geben Aussagen zur Nachfrage nach qualitativ hochwertigen Holzhackschnitzeln wieder. So verzeichnete annähernd ein Drittel der Hackschnitzelproduzenten im Betriebsjahr 2015 Neukunden mit höheren Ansprüchen an die Holzhackschnitzelqualität. Aus Sicht der teilnehmenden Hackschnitzelproduzenten wird der zukünftige Markt für qualitativ hochwertige Holzhackschnitzel i. d. R. bei einem Einsatz in Feuerungsanlagen bis 300 kW Nennwärmeleistung gesehen.

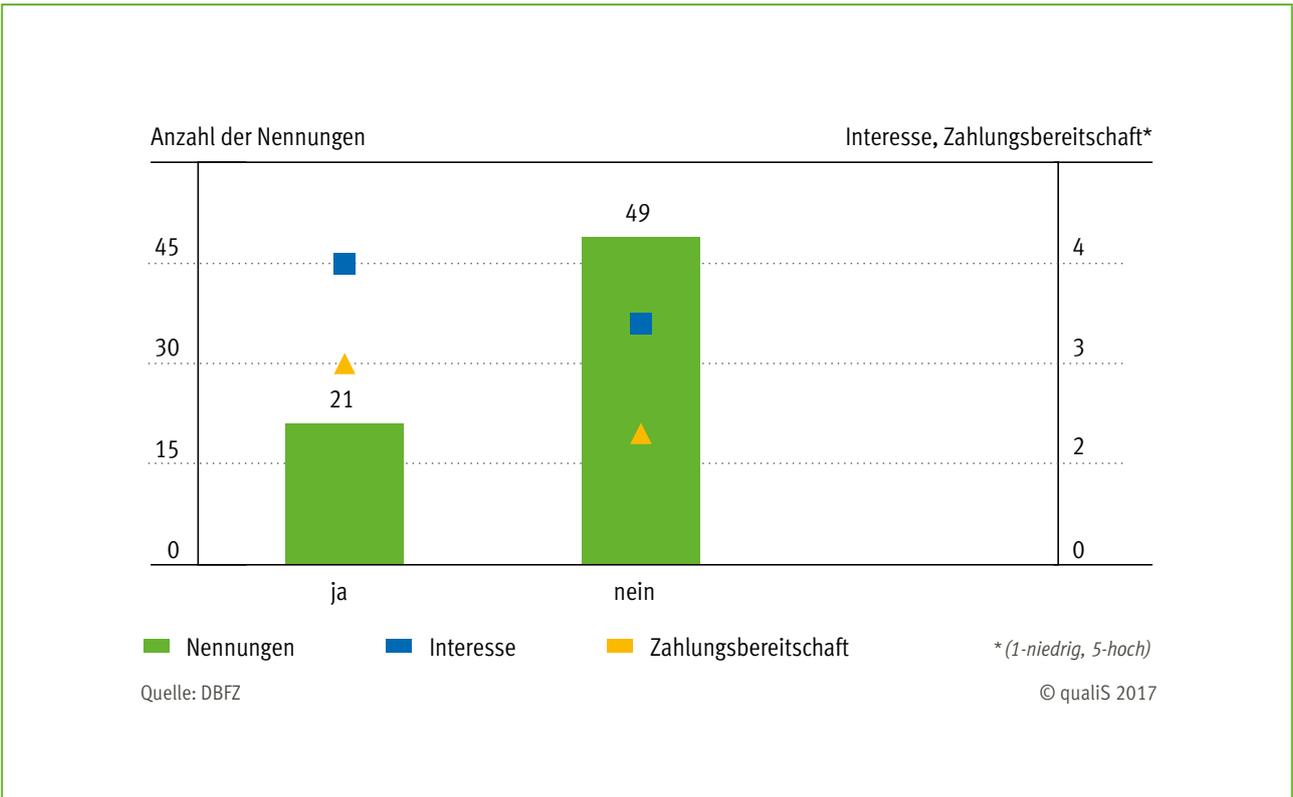


Abbildung 4.7: Sind seit 2015 (Inkrafttreten der Stufe 2 der 1. BImSchV) neue Kunden mit höheren Ansprüchen an die Qualität der Holz hackschnitzeln und einer höheren Zahlungsbereitschaft hinzugekommen? n = 70

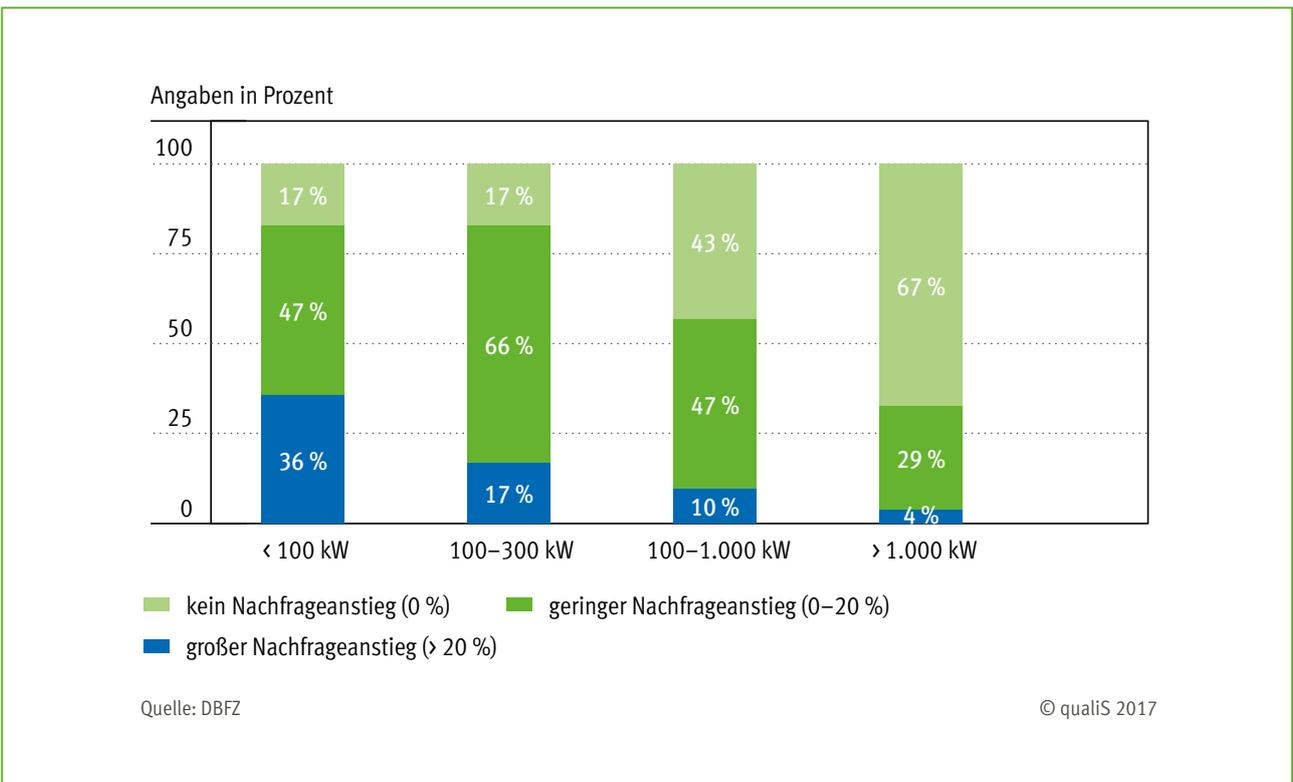


Abbildung 4.8: Wie schätzen Sie die zukünftige Nachfrage nach Holz hackschnitzeln im höheren Qualitätssegment seitens unterschiedlicher Zielgruppen ein? n = 59

The background of the entire page is a close-up photograph of wood chips, which are small, irregular pieces of wood. The chips are light brown and have a fibrous texture. They are scattered across the page, with some in sharp focus and others blurred in the background. The overall color palette is warm and natural, dominated by the browns and tans of the wood.

KAPITEL 5–7

Brennstoffqualität von Holzhackschnitzeln

Holzhackschnitzelproduktion

Mechanische Aufbereitung von Holzhackschnitzeln durch Siebung und Trocknung

5 BRENNSTOFFQUALITÄT VON HOLZHACKSCHNITZELN

Kleine bis mittelgroße Hackschnitzelfeuerungen benötigen für eine effiziente und emissionsarme Verbrennung eine definierte und gleichbleibende Brennstoffqualität [5-1]. Nur durch das aufeinander abgestimmte Zusammenspiel von Anlagentechnik, Benutzerverhalten und Brennstoff kann ein optimaler Betrieb gewährleistet werden. Gerade bei sehr heterogenen Naturprodukten wie Holzhackschnitzeln kann die Brennstoffqualität jedoch aufgrund unterschiedlicher Ausgangsmaterialien und Prozessketten stark schwanken [5-2]. Im Folgenden werden wichtige Brennstoffparameter zusammengefasst und praxisrelevante Brennstoffspezifikationen vorgestellt.

5.1 Qualitätsparameter und deren Einfluss auf die Verbrennung

Zahlreiche Brennstoffqualitätsparameter beeinflussen die emissions- und störungsarme Verbrennung (siehe Tabelle 5.1). Um den optimalen Anlagenbetrieb gewährleisten zu können, sollten

Holzhackschnitzel einen zu der jeweiligen Feuerung passenden Wassergehalt und Aschegehalt sowie eine geeignete Partikelgröße, z. B. für den reibungslosen Transport in Förderschnecken aufweisen. Hierbei sind die Angaben des Kesselherstellers zu beachten [5-1]. Auch Emissionen an Kohlenstoffmonoxid (CO) und Staub sowie an Schwefeldioxid (SO₂) und an Stickstoffoxiden (NO_x) lassen sich zu Teilen auf den Brennstoff zurückführen. Staubemissionen entstehen z. B. brennstoffbedingt, wenn sich ein hoher Anteil an sogenannten aerosolbildenden Elementen im Brennstoff befindet [5-3]. Hierbei ist vor allem Kalium (K) zu nennen, welches im Fall von Holzbrennstoffen i. d. R. den größten Anteil der Aerosolbildner ausmacht. Es gehört zu den sogenannten „verbrennungskritischen Elementen“, da es neben einer erhöhten Aerosolbildung auch weitere negative Effekte, z. B. die Bildung von Schlacke im Brennraum und auf dem Rost, hervorrufen kann. Verbrennungskritische Inhaltsstoffe finden sich stoffwechselbedingt häufig in grünen Pflanzenteilen, z. B. in Nadeln und Blättern, in dünnen Ästen und in der Rinde. Die Konzentrationen im Holz sind dagegen deutlich geringer.

Tabelle 5.1: Relevante Parameter für die Brennstoffqualität von Holzhackschnitzeln [5-1]

Qualitätsparameter	Einfluss des Qualitätsparameters
Wassergehalt	Heizwert, Lagerfähigkeit, CO-Emissionen, Brennstoffgewicht, Verbrennungstemperatur
Heizwert	Energiegehalt des Brennstoffs
Aschegehalt	Partikelemissionen, Rückstandsbildung und -verwertung
Ascheschmelzverhalten	Schlackebildung und -ablagerung
Partikelgrößenverteilung, Überlängen, Feinanteil	Störung in der Brennstoffzufuhr, Rieselfähigkeit, Brückenbildungsneigung, Belüftungs- und Trocknungseigenschaften, Staubentwicklung, Explosionsgefahr
Stickstoff	NO _x -Emissionen
Schwefel	SO ₂ -Emissionen, Hochtemperaturkorrosion, Partikelemissionen
Chlor	Emissionen von HCl und halogenorganischen Verbindungen, Partikelemissionen
Kalium	Ascheerweichungsverhalten, Hochtemperaturkorrosion, Partikelemissionen
Natrium	Partikelemissionen
Magnesium und Calcium	Ascheschmelzverhalten, Ascheeinbindung von Schadstoffen, Ascheverwertung, Partikelemissionen
Silizium	Aschegehalt, Ascheschmelzverhalten
Schwermetalle	Ascheverwertung, Schwermetallemissionen, z. T. katalytische Wirkung (z. B. bei PCDD/F-Bildung), Partikelemissionen



Qualitativ hochwertige Hackschnitzel

Eine hohe Brennstoffqualität zeichnet sich auch durch einen homogenen Brennstoff aus. Starke Schwankungen sind v.a. beim Wassergehalt, der Partikelgröße und dem Aschegehalt zu vermeiden, damit die jeweilige Feuerung bestmöglich auf eine gleichbleibende Qualität eingestellt werden kann.

5.2 Normung und Zertifizierung

Die Qualität von biogenen Festbrennstoffen lässt sich mithilfe internationaler Normen beschreiben. Holzhackschnitzel zur Verwendung in kleinen bis mittelgroßen Feuerungen können mithilfe der 2021 erschienenen Fassung der DIN EN ISO 17225-4 klassifiziert werden [5-4]. Sie ersetzt die Fassung von 2014 sowie die früheren Normen, wie z. B. die Ö-Norm M7133

oder die DIN EN 14961-4. In der DIN EN ISO 17225-4 werden vier hochwertige Produktklassen (Klasse A1 bis B2) definiert und die zugehörigen genauen Anforderungen an den Wassergehalt, die Partikelgrößenverteilung, den Aschegehalt und die chemische Zusammensetzung festgelegt (siehe Tabelle 5.2 und 5.3). Daneben werden geeignete Ausgangsmaterialien angegeben. Hierbei handelt es sich vornehmlich um naturbelassenes, chemisch unbehandeltes Holz. So ist z. B. der Einsatz von Waldrestholz und schwachem Stammholz für qualitativ hochwertige Holzhackschnitzel ab Klasse A1 erlaubt, Holz von Kurzumtriebsplantagen (KUP) von möglicherweise belasteten Standorten ist aber erst ab Klasse B1 zugelassen. In der DIN EN ISO 17225-4 von 2021 wurden einzelne Veränderungen vorgenommen, um die Norm besser der Praxis anzupassen. Die wesentlichen Änderungen betreffen den Aschegehalt, der in Klasse A1 von

Tabelle 5.2: Spezifikationen für Holzhackschnitzel nach DIN EN ISO 17225-4:2021 (Auszug) [5-4]

Qualitätsklasse	Einheit	A1	A2	B1	B2
Herkunft nach DIN EN ISO 17225-1		1.1.1 Vollbäume ohne Wurzeln ^{a)} 1.1.3 Stammholz 1.1.4 Waldrestholz 1.2.1 Chemisch unbehandelte Holzurückstände	1.1.1 Vollbäume ohne Wurzeln ^{a)} 1.1.3 Stammholz 1.1.4 Waldrestholz 1.2.1 Chemisch unbehandelte Holzurückstände	1.1 Wald- und Plantagenholz und anderes naturbelassenes Holz ^{b)} 1.2.1 Chemisch unbehandelte Holzurückstände	1.2 Industrie-Restholz 1.3.1 Chemisch unbehandeltes Gebrauchtholz
Wassergehalt	m-%	≤ 25 Werte < 10 sind anzugeben	> 25 und ≤ 55 Wertebereich ist anzugeben	≤ 35 Werte < 10 sind anzugeben	> 15 und ≤ 55 Wertebereich ist anzugeben
Aschegehalt	m-%, wf	≤ 1,5	≤ 1,5	≤ 3,0	
Heizwert	MJ/kg	kleinster Wert ist anzugeben			

a) ohne Klasse 1.1.1.3 (Kurzumtriebsplantagenholz), falls der Brennstoff von belasteten Flächen stammt

b) ohne Klasse 1.1.5 (Stümpfe/Wurzeln) und 1.1.6 (Rinde)

wf = wasserfrei

1,0 m-% auf 1,5 m-% erhöht wurde, den Wassergehalt, der in allen Klassen etwas genauer gefasst wurde, sowie die Partikelgrößenklassen (siehe Tabelle 5.2 und 5.3). Ergänzt wurde diese Norm durch die DIN EN ISO 17225-9, die Anforderungen an Schredderholz und Holzhackschnitzel für industrielle Anwendungen festlegt [5-5].

Kesselhersteller, Hackschnitzelproduzenten und Brennstoffkunden können sich an den Vorgaben aus der DIN EN ISO 17225-4 orientieren, um den am besten geeigneten Brennstoff für die jeweilige Feuerung zu definieren, zu produzieren oder zu erwerben. In weiterführenden Prüfnormen werden die notwendigen Messmethoden beschrieben, mithilfe derer sich die definierten Qualitätsparameter einheitlich bestimmen lassen. Die Verwendung der DIN EN ISO 17225-4 erfolgt freiwillig, eine gesetzliche Verpflichtung besteht nicht.

Aufgrund der Komplexität der gängigen Produktnormen für biogene Festbrennstoffe und um den Kauf hochwertiger Holz-

hackschnitzel für private und kommunale Kunden ohne forstlichen Hintergrund zu vereinfachen, wurden leichter verständliche Nachweismöglichkeiten (Zertifikate, z. B. ENplus Holzhackschnitzel, <https://enplus-hackschnitzel.de>) für den Handel erarbeitet.

Die Zielsetzung eines Zertifikats für Holzhackschnitzel ist es, die Produkthanforderungen aus den Normen unter einem Label zusammenzufassen und somit dem Endkunden die Einarbeitung in die umfangreichen Regelwerke zu ersparen. In Abstimmung mit der Praxis (Kesselhersteller, Brennstoffproduzenten) gehen die Anforderungen teilweise über die Spezifikationen der DIN EN ISO 17225-4 hinaus, indem z. B. der Feinanteil oder die maximale Partikellänge weiter reduziert werden. Vor allem für den Wassergehalt werden Anforderungen an einen engen Wertebereich gestellt. Neben der Produktspezifikation setzen die Zertifizierungssysteme ein betriebliches Qualitätsmanagement voraus, mithilfe dessen die langfristige Einhaltung einer gleichbleibenden Produktqualität gewährleistet werden soll.

Tabelle 5.3: Größenklassen und Feinanteilklassen für Holzhackschnitzel nach DIN EN ISO 17225-4:2021 [5-4]

Größenklasse ^{a)}	Hauptfraktion	Grobanteil ^{b)}	Feinanteil (F)	maximale Länge (L) ^{d)}
	≥ 60 %, mm	m-% (Sieböffnungsgröße oder maximale Partikellänge)	% ≤ 3,15 mm	mm
P16s	3,15 mm ≤ P ^{a)} < 16 mm	≤ 6 % ≥ 31,5 mm	≤ 15 %	45 mm
P31s	3,15 mm ≤ P < 31,5 mm	≤ 6 % ≥ 45 mm	≤ 10 %	120 mm
P45s	3,15 mm ≤ P < 45 mm	≤ 10 % ≥ 63 mm	≤ 10 %	200 mm
P16	3,15 mm ≤ P < 16 mm	≤ 6 % ≥ 31,5 mm	Anhand der nachstehenden F-Klassen anzugeben	Wert ist anzugeben
P31	3,15 mm ≤ P < 31,5 mm	≤ 6 % ≥ 45 mm		
P45	3,15 mm ≤ P < 45 mm	≤ 10 % ≥ 63 mm		
P63	3,15 mm ≤ P < 63 mm	≤ 10 % ≥ 100 mm		
Feinanteil, F (< 3,15 mm, m-%)				
F02	≤ 2 %	F20	≤ 20 %	
F05	≤ 5 %	F25	≤ 25 %	
F10	≤ 10 %	F30	≤ 30 %	
F15	≤ 15 %	F30+	> 30 % (Höchstwert ist anzugeben)	

P Partikelgrößenklasse, bezogen auf Partikel, die durch die angegebene Sieböffnungsgröße eines Rundlochsiebess passen.

Die tatsächlichen Maße der Partikel können von diesen Werten abweichen, insbesondere hinsichtlich der Länge.

a) DIN EN ISO 17225-1 und DIN EN ISO 17225-9 führen weitere Klassen auf (PL10 bis PL30+).

b) Partikel > 100 mm werden vor der Messung der Größenklasse manuell aussortiert und separat gewogen.

Alle anderen Fraktionen werden mit einem mechanischen Siebverfahren bestimmt.

c) Bei der manuellen Siebung (siehe Kapitel 10.4) werden die verschiedenen Fraktionen oberhalb der Hauptfraktion inkl. der manuell aussortierten Partikel > 100 mm nicht unterschieden. Bei Überschreitung der gemäß DIN EN ISO 17225-4 angegebenen Anforderungen für den Grobanteil wird ein entsprechender Hinweis ausgegeben.

d) Die maximale Länge ist nur für die Partikel zu bestimmen, die sich im gesiebten Grobanteil und den manuell aussortierten Partikeln über 100 mm befinden. In einer Probe von etwa 10 l dürfen höchstens 2 Stücke die maximale Länge überschreiten, wenn die Querschnittsfläche kleiner als 0,5 cm² (entspricht etwa einem Durchmesser von 7 mm) ist.

e) P meint den Umfang der Fraktion von Partikeln der angegebenen Größe, angegeben in Massen-%.

Folgende Änderungen wurden in der Klassifizierung der Partikelgrößen in der Fassung von 2021 gegenüber der DIN EN ISO 17225-4 von 2014 vorgenommen:

- Bezeichnung der „S“-Klassen auf „s“-Klassen geändert
- maximale Länge für P31s: 120 mm statt 150 mm
- maximale Querschnittsfläche: entfallen
- Einführung der Klassen P16 bis P63 und der Feinanteilklassen (vorher nur in DIN EN ISO 17225-1 [5-6])

6 HOLZHACKSCHNITZEL-PRODUKTION

Für die Produktion von Holzhackschnitzeln existiert in der Praxis eine Vielzahl an Verfahrensketten [6-1], [6-2]. Die Brennstoffe werden aus verschiedenen Ausgangsmaterialien und mit unterschiedlichen Aufbereitungsschritten produziert. Dementsprechend weit streut die Qualität des Brennstoffs. Vor allem private Betreiber von Hackschnitzelfeuerungen, z. B. aus der Landwirtschaft, besitzen häufig eigenen Wald und stellen ihren Brennstoff selbst her [6-2]. Im Folgenden wird daher auf die Brennstoffproduktion im Wald und die dazugehörigen Optimierungsmaßnahmen bezüglich der Brennstoffqualität eingegangen. Danach folgt eine Bewertung weiterer Brennstoffquellen.

6.1 Brennstoffqualität bei der Holzhackschnitzelproduktion im Wald

Waldhackschnitzel fallen meistens als Koppelprodukt bei der Holzernnte an [6-2]. Daneben können Holzhackschnitzel bei der Waldpflege, z. B. bei der Jungdurchforstung oder bei der Aufarbeitung von Windwurfflächen und Käferholz produziert werden. Vor allem Letzteres bietet sich als Maßnahme gegen die Ausbreitung des Borkenkäfers in Nadelholzbeständen an. Der eigentliche Verfahrensschritt „Hacken“ ist dabei i. d. R. zeitlich von der jeweiligen Erntemaßnahme entkoppelt. Zum Einsatz kommen meist leistungsstarke, mobile Trommelhacker, zu gewissen Anteilen aber auch Scheibenrad- und Schneckenhacker. Gehackt wird häufig direkt an der Waldstraße, an der die Hackholzpolter vorkonzentriert werden.

Schon bei der Prozesskette im Wald kann die Brennstoffqualität maßgeblich positiv oder negativ beeinflusst werden [6-2], [6-3]. Hierbei sind folgende übergeordnete Punkte zu nennen:

- Auswahl des Ausgangsmaterials
- Auswahl von Ernte- und Bringungsverfahren
- Hackmaschine und Maschineneinstellungen
- saubere Arbeitsweise in der gesamten Prozesskette
- Erfahrungsgrad des Maschinenführers, bzw. der Maschinenführerin

Die Brennstoffqualität hängt maßgeblich vom Ausgangsmaterial ab. Frische Waldhackschnitzel weisen häufig Wassergehalte von ca. 50 m-% auf, weshalb sie für die Anwendung in kleinen und mittelgroßen Anlagen i. d. R. getrocknet werden müssen (siehe Kapitel 6.2 und 7).



Hackschnitzelproduktion aus Waldrestholz:
Vorkonzentrierter Polter (oben) und Hacken an der Waldstraße (unten)

Tabelle 6.1: Typische Werte für Waldhackschnitzel

	Waldrestholz und Vollbäume mit Nadeln, Blättern und Rinde	Energierundholz
Wassergehalt (m-%)	ca. 45–55	
Aschegehalt (m-%, wf)	ca. 1,5–3,5	ca. 0,5–1,5
Heizwert (MJ/kg, wf)	ca. 18,5–19,5	ca. 18,5–19,0
Feinanteil (m-%)	ca. 10–25	ca. 5–15

Quelle: TFZ-Bericht 40

Daneben hängen noch weitere Brennstoffparameter vom Ausgangsmaterial ab. Vor allem das Sortiment hat großen Einfluss auf den Aschegehalt, den Feinanteil sowie den Anteil an Überlängen (siehe Tabelle 6.1). Hierbei zeigen vor allem Holzhackschnitzel aus Waldrestholz (z. B. Kronenmaterial, Äste) aufgrund hoher Anteile an Nadeln und Rinde oft einen höheren Feinanteil als z. B. Holzhackschnitzel aus sogenanntem „Energierundholz“ (dünne, auch grob entastete Stammabschnitte geringer Qualität) [6-2]. Holzhackschnitzel aus Waldrestholz lassen sich aufgrund eines hohen Feinanteils und aufgrund von Überlängen auch deutlich seltener in die Partikelgrößenklassen P16s, P31s und P45s nach DIN EN ISO 17225-4 einordnen als Holzhackschnitzel aus Energierundholz (siehe Kapitel 5).

Neben dem Sortiment (Waldrestholz, Energierundholz) hat auch die Baumart einen Einfluss auf die Brennstoffqualität. So haben harte Laubhölzer (z. B. Buche, Eiche, Birke) eine höhere Schüttdichte als z. B. Nadelholz oder weiches Laubholz. Im Gegensatz dazu besitzen Nadelhölzer häufig einen geringfügig höheren Heizwert je Masse aufgrund höherer Anteile an Harz oder Lignin.

Die Wahl der passenden Hackmaschine und der richtigen Maschineneinstellungen ist ebenso maßgeblich für eine hohe Brennstoffqualität [6-2]. Dabei beeinflusst die Maschine vor allem die Stückigkeit, d. h. die Partikelgröße und die Partikelform, den Feinanteil und die Überlängen. Durch unterschiedliche Schneidsysteme und die teilweise einstellbaren Schnittweiten der Hackmesser, aber auch durch Variation der Drehzahl des Schneidaggregates zum Einzug des Hackholzes verändert sich die Größe der Partikel. Engmaschige Prallsiebe hinter der Hackertrommel eines Trommelhackers minimieren Überlängen, können aber wiederum den Feinanteil erhöhen. Vor allem auf eine gute Messerschärfe sollte stets geachtet werden, um sowohl einen geringen Feinanteil als auch eine glattkantige Partikelform zu gewährleisten. Förderbänder für den Materialaustrag können vorteilhaft gegenüber dem Austrag mittels Gebläse sein, da es durch den sanfteren Austrag zu keiner zusätzlichen Nachzerkleinerung der Partikel kommt. Weiterentwicklungen bei der Anordnung der Messer auf der Hackertrommel oder die Bauweise und Dimension der Trommel selbst können die Partikelgröße und die Partikelform, aber auch den Kraftstoffverbrauch beim Hacken weiter optimieren.



Beispiel für ein Schneidaggregat: Halbdurchlässige Hackertrommel mit versetzten Messern



Beispiel für extreme Schlackebildung bei unpassender Brennstoffqualität, angefallen im Aschebehälter einer 1,3 MW Feuerung

Ein Eintrag von Fremdmaterial im Brennstoff, vor allem durch Mineralboden, führt zu einer erheblichen Erhöhung des Aschegehalts und senkt den Anteil des brennbaren Materials [6-3]. Die damit verbundenen hohen Anteile an Silizium und anderen Elementen (z. B. Schwermetalle) können zu einem veränderten Ascheschmelzverhalten führen oder die Entsorgung der Asche erschweren. Weiterhin führt ein erhöhter Bodenanteil im Brennstoff zu stärkerem Verschleiß der Hackmesser. Der Eintrag von Mineralboden kann in allen Abschnitten der Verfahrenskette einschließlich Holzernte und Rücken stattfinden und muss in jedem Fall vermieden werden.

Qualitätsverbessernd können auch Innovationen in dem vorausgehenden Teil der Prozesskette wirken. Neue Bereitstellungsverfahren, wie die gezielte Aushaltung von grob entastetem Energierundholz aus Nadelholzkronen oder die Verwendung von neuartigen Harvester-Aggregaten, die eine Entrindung des Holzes ermöglichen, werden untersucht und versprechen neben positiven Effekten auf die Nährstoffnachhaltigkeit von Forstbeständen eine Verbesserung in der Brennstoffqualität.

Letztlich ist auch der Erfahrungsgrad der Maschinenführer zu nennen. Unsaubere Kranführung kann einen erhöhten Eintrag von Mineralboden zur Folge haben. Auch ist eine gleichmäßige Beschickung des Hackers nötig, bei der z. B. die Hackertrommel nicht leerläuft. Beim regelmäßigen Leerlaufen der Trommel haben lange Partikel die Möglichkeit, sich senkrecht zum Prallsieb aufzustellen und dieses zu passieren. Hierdurch erhöht sich der Anteil an Überlängen, sodass die Verwendung des Brennstoffs in Feuerungen mit Förderschnecken mit kleinem Querschnitt kritisch wird. Im Gegensatz dazu führt die Überlastung der Maschine durch zu starke Beschickung oft zu automatisch gesteuerten Unterbrechungen des Einzugs und zu einem Rückstau des gehackten Materials, wodurch sich u. a. der Feinanteil erhöhen kann.

Zusammenfassend ergibt sich somit schon bis einschließlich zum Prozessschritt „Hacken“ eine Vielzahl an Möglichkeiten, die Brennstoffqualität von Waldhackschnitzeln sowohl positiv als auch negativ zu verändern. Vor allem Betreiber privater Hackhackschnitzelfeuerungen, die ihren Brennstoff selbst herstellen, haben hiermit schon eine Reihe an Optimierungsmaßnahmen, um eine hohe Brennstoffqualität auch ohne weitere Aufbereitungsschritte zu gewährleisten.

6.2 Lagerung und natürliche Trocknung von Waldhackschnitzeln und Hackholz

Frische Waldhackschnitzel haben häufig einen zu hohen Wassergehalt und müssen getrocknet werden (siehe Abschnitt 6.1). Neben technischen Trocknungsverfahren, z. B. der Nutzung von kostengünstiger Abwärme aus Biogasanlagen (siehe Kapitel 7), gibt es die Möglichkeit, die Brennstoffe bei der Lagerung im gehackten und ungehackten Zustand über natürliche Prozesse zu trocknen [6-1]. Die Lagerung ist dabei ein regelmäßiger und wichtiger Bestandteil der Bereitstellungskette, denn sie dient als zeitlicher Ausgleich zwischen dem Anfall des Brennstoffs und dem Verbrauch. Sie wird aber auch gezielt zur Trocknung eingesetzt.



Lagerung von Holzhackschnitzeln in Haufwerken mit und ohne Vliesabdeckung

Die Lagerung von Holzhackschnitzeln findet sowohl im Freien als auch unter Dach, d. h. in Lagerhallen statt. Stellenweise werden luftdurchlässige Vliese verwendet, um die Wiederbefeuchtung der Holzhackschnitzel durch Niederschlag zu vermeiden. Gelagert wird sowohl auf unbefestigten als auch auf befestigten Untergründen. In der Praxis wird dabei eine Vielzahl unterschiedlicher Lagervarianten (z. B. Größe und Ausformung der Haufwerke) beobachtet.

Bei der Lagerung frischer Holzhackschnitzel kommt es zu einer starken Erwärmung der Schüttungen. Diese Erwärmung wird durch biologische Abbauprozesse der vorhandenen Mikroorganismen, z. B. durch Bakterien und Pilze, bedingt. Hierdurch geht Trockenmasse, d. h. Brennstoff verloren. Diese Trockenmasseverluste können im Bereich von 0,4 bis zu im Extremfall 4,5 m-% pro Monat liegen [6-1]. Die Abbaurate wird u. a. durch hohe Anteile an Feinmaterial und grüner Biomasse, aber auch durch einen hohen Einlagerungswassergehalt sowie durch die große Höhe und eine starke Verdichtung der Haufwerke gefördert. Allerdings ermöglicht erst die durch den Abbau bedingte Erwärmung der Schüttungen die Trocknung der Brennstoffe. Die schlussendlich bereitgestellte Menge an Energie hängt dabei nicht nur von den Verlusten, sondern auch von dem Wassergehalt bei Auslagerung ab, denn bereits entferntes Wasser muss bei der Verbrennung nicht mehr verdampft werden. Aktuelle



Beispiel für Schichtbildung in einem Holzhackschnitzelhaufwerk

Erfahrungen zeigen, dass eine gute Trocknung vor allem in niederschlagsarmen Sommermonaten geschieht. Eine Lagerung mit dem Ziel, den Wassergehalt der Brennstoffe zu senken, sollte daher vor allem in dieser Zeit stattfinden. Die Verwendung von Vliesen kann den Trocknungseffekt bei der Freilandlagerung im Sommer stellenweise noch verbessern, bedeutet aber, analog zur Lagerung in der Halle, einen höheren Kosten- und Arbeitsaufwand. Zu beachten ist, dass vor allem beim Abbau der Haufwerke von unbefestigten Lagerplätzen kein zusätzlicher Mineralboden in den Brennstoff gelangt und es somit zu keiner Verschlechterung der Brennstoffqualität kommt. Die Holzhackschnitzel sollten, wenn möglich, nach der Lagerung homogenisiert werden, da sich Schichten mit unterschiedlichen Wassergehalten bilden können. Die Durchmischung kann hierbei mittels Radlader erfolgen.

Hohe Schüttungen von deutlich > 4 m, eine sehr lange Lagerdauer über mehrere Monate oder das Verdichten der Haufwerke durch das Befahren mit dem Radlader sind für die Lagerung frischer Holzhackschnitzel mit einem hohen Wassergehalt > 30 m-% zu vermeiden, da sich sonst das Risiko der Selbstentzündung (zu hohe Eigenerwärmung, kein Wärmeabfluss) erhöht [6-1]. Als Lagerort sollten zudem Standorte gewählt werden, die nicht direkt an Wohngebäude grenzen, da es durch Pilzbesiedelung zu Sporenflug kommen kann. Eine Alternative zur Lagerung und Trocknung im Haufwerk ist die Lagerung im ungehackten Polter. Auch hierbei kommt es zu der natürlichen Trocknung der Brennstoffe, jedoch weniger durch Selbsterwärmung als vielmehr durch natürlichen Luftdurchzug und Sonneneinstrahlung. Als Lagerort sollte, wie auch bei der Trocknung von Scheitholz, ein luftiger, sonniger Ort, z. B. am Feldrand gewählt werden. Der Vorteil der Trocknung im Polter ist, dass die Massenverluste meist niedriger bzw. vergleichbar zu denen im Haufwerk sein sollten, dieser Verlust jedoch vor allem bei der Lagerung von ungehacktem Waldrestholz teilweise durch ein Abrieseln von Nadeln, Blättern und Rinde und nicht nur durch Zersetzung zu erklären ist. Hierdurch verringern sich häufig auch der Aschegehalt und der Feinanteil. Weiterhin könnte am Brennstoff anhaftender Mineralboden durch Niederschlag abgewaschen werden. Voraussetzung ist jedoch auch hier, dass nach der Trocknung auf eine saubere Arbeitsweise geachtet



Vorgetrockneter Hackholzpolter am Feldrand

wird. Aktuelle Versuche zeigen, dass trotz unterschiedlicher natürlicher Prozesse bei der Poltertrocknung im Sommer ähnliche Trocknungsraten erzielt werden können wie bei der Trocknung im Haufwerk. Im Winter konnten dagegen nur bei abgedeckten Haufwerken aus Waldrestholz hackschnitzeln durch hohe Eigenwärmerung nennenswerte Trocknungseffekte erzielt werden. Eine Trocknung von ungehacktem Holz ist allerdings nicht generell zu empfehlen, denn hierzu muss auch die Waldschutzsituation, z. B. die Bildung möglicher Brutherde für den Borkenkäfer, berücksichtigt werden.

Zu beachten ist, dass beide Varianten, die Trocknung im Polter und die Trocknung im Haufwerk, keinen absoluten Trocknungserfolg garantieren können. Dieser hängt immer auch von den gegebenen Lagerbedingungen, z. B. von der Temperatur und dem Niederschlag in dem jeweiligen Jahr ab. Sehr niedrige Wassergehalte < 20 m-%, wie sie für manche Kessel empfohlen werden, sind mit natürlichen Trocknungsprozessen zudem nur schwer zu erreichen. Hier wären technische Trocknungsverfahren zu bevorzugen. Allerdings stellt die natürliche Trocknung gerade für Privatanwender eine kostengünstige Alternative dar.

Aktuell werden Anforderungen an die Lagerung und den Umschlag von Holzhackschnitzeln unter Umwelt-, Gesundheits- und Sicherheitsaspekten für die energetische Nutzung im privaten und gewerblichen Bereich in der VDI-Richtlinie 3464 Blatt 2 erarbeitet. In dieser finden sich zahlreiche Empfehlungen an die Praxis, um mögliche Gefährdungen für Mensch und Umwelt auszuschließen, die durch eine unsachgemäße Lagerung von Holzhackschnitzeln entstehen können, beispielsweise durch Selbstentzündung, Sickerwasserausträge, Emissionen (Holzstaub, Bioaerosole) oder Verletzungen (Arbeitsschutz). Die VDI 3464 Blatt 2 wird voraussichtlich im Jahr 2022 veröffentlicht.

6.3 Weitere Quellen für Holzhackschnitzel

Waldhackschnitzel stellen nur eine von einer Vielzahl möglicher Quellen für die Hackschnitzelproduktion dar [6-2]. Daneben fallen Holzhackschnitzel häufig als Nebenprodukte der Sägeindustrie an. Diese Holzhackschnitzel weisen i. d. R. keine Anteile an Nadeln oder Ästen auf und haben häufig sehr niedrige Rindenanteile. Der Aschegehalt und die Gehalte an verbrennungskritischen Inhaltsstoffen sind somit für dieses Sortiment sehr gering. Naturbelassene Holzhackschnitzel aus Sägerestholz sind nach der Trocknung auf den gewünschten Zielwassergehalt und optional der Ausiebung des holzigen Feinanteils als besonders geeigneter Brennstoff für Kleinf Feuerungsanlagen zu bewerten. Auch die Einhaltung strenger Emissionsgrenzwerte für CO und Staub ohne technische Minderungsmaßnahmen (z. B. elektrostatische Staubabscheider) sollten am ehesten mit diesen Brennstoffen möglich sein. Im Unterschied zum Waldhackschnitzel hat der private Anwender jedoch kaum die Möglichkeit, diese Brennstoffe selbst zu erzeugen. Sie müssen somit zugekauft werden. Weitere Brennstoffquellen sind z. B. gezielt für die Brennstoffproduktion angebaute Hölzer aus dem Kurzumtrieb (KUP) sowie Resthölzer aus der Landschaftspflege, aus der Pflege von Verkehrswegen und Stromtrassen oder aus dem urbanen Bereich (sogenanntes Siedlungsholz). Diese Brennstoffe sind aufgrund hoher Rinden- und Grünanteile meist als weniger geeignet für Kleinf Feuerungsanlagen einzuordnen [6-3]. Auch ist bei manchen Sortimenten eine Verschmutzung, z. B. durch Streusalz (Erhöhung der Korrosionsgefahr) möglich. Ein Einsatz ohne sekundäre Staubminderungsmaßnahmen dürfte schwierig sein.

Einen Sonderfall stellt gebrauchtes Holz dar, welches am Ende seines Lebenszyklus thermisch verwertet werden soll. Diese Hölzer sind häufig chemisch behandelt und dürfen dann nicht in Kleinfeuerungsanlagen, sondern nur in speziell zugelassenen Altholzanlagen verbrannt werden. Chemisch unbehandeltes Gebrauchtholz wäre prinzipiell zwar zulässig, kann jedoch häufig optisch nicht eindeutig bewertet werden, da viele Holzschutzmittel nicht mit bloßem Auge erkennbar sind. Diese können jedoch korrosionsfördernde Inhaltsstoffe und Schwermetalle beinhalten oder zu besonders schädlichen Emissionen z.B. von PCB (Polychlorierte Biphenyle) führen. Somit sollte auch die Verwendung von optisch als unbehandelt bewertetem Gebrauchtholz in Kleinfeuerungsanlagen vermieden werden.

6.4 Empfehlungen für den Eigenverbraucher

Insgesamt lässt sich eine Reihe von Empfehlungen für Betreiber einer privaten Hackschnitzelheizung aussprechen:

- Auswahl eines hochwertigen Ausgangsmaterials für die Brennstoffproduktion, z.B. (grob entastetes) Energierundholz oder Sägerestholz
- passende Hackmaschine/Maschineneinstellung für die richtige Partikelgröße und für einen niedrigen Anteil an Feinmaterial und Überlängen wählen
- saubere Arbeitsweise in der gesamten Prozesskette inklusive Holzernte, Rücken und Transport
- Frische Holzhackschnitzel müssen für den Einsatz in kleinen Feuerungen getrocknet werden. Zur Auswahl steht die natürliche Trocknung in Haufwerken und Poltern, aber auch technische Trocknungsverfahren mit Abwärme, z. B. von Biogasanlagen in Lohn-trocknungsbetrieb.
- Eine regelmäßige Eigenkontrolle der Brennstoffqualität bei der Produktion sollte durchgeführt werden (siehe Kapitel 9 und 10).

Sollte die gewünschte Brennstoffqualität nicht erreicht werden können, so kann diese durch sekundäre Aufbereitungsmaßnahmen, z. B. durch technische Trocknung und Siebung in Lohnbetrieben, weiter verbessert werden (siehe Kapitel 7).

- www.tfz.bayern.de
- www.lwf.bayern.de

7 MECHANISCHE AUFBEREITUNG VON HOLZHACK-SCHNITZELN DURCH SIEBUNG UND TROCKNUNG

Aufgrund der Nachfrage nach einer hohen Holzhackschnitzelqualität findet das dadurch erforderliche betriebliche Qualitätsmanagement bei der Produktion und bei der Anlieferung von biogenen Festbrennstoffen zunehmend Anwendung. Sekundäre Brennstoffaufbereitungsschritte, z. B. die mechanische Siebung oder die technische Trocknung, stellen Möglichkeiten dar, um z. B. den Wassergehalt und den Aschegehalt zuverlässig zu reduzieren oder um die passende Partikelgrößenverteilung zu erreichen [7-1]. Eine mechanische Siebung verringert zudem den Anteil an verbrennungskritischen Inhaltsstoffen, da viele dieser Elemente in der grünen Biomasse (Nadeln, Blätter) und in der Rinde gespeichert sind oder über Verunreinigungen der Brennstoffe mit Mineralboden bei der Holzernte, beim Hacken, beim Transport oder bei der Aufbereitung der Brennstoffe am Biomassehof eingetragen werden können (siehe Kapitel 6, [7-2]). Aufgrund der Vielzahl an Aufbereitungsmethoden gibt es allerdings bisher noch wenige verlässliche Daten zur tatsächlichen Steigerung der Brennstoffqualität. Auch hinsichtlich ihres Emissionsverhaltens wurden mechanisch aufbereitete Holzhackschnitzel bisher nur selten untersucht.

In Kapitel 7.1 werden zunächst gängige Aufbereitungstechniken beschrieben. Anschließend erfolgt die Darstellung von sechs Fallstudien, die bei ausgewählten Hackschnitzelproduzenten begleitet wurden (Kapitel 7.2).

7.1 Sieb- und Trocknungstechniken

Zur Marktanalyse gängiger Sieb- und Trocknungstechniken für die Aufbereitung von Holzhackschnitzeln wurde im Dezember 2015 eine Online-Umfrage mit Brennstoffproduzenten und Händlern durchgeführt (siehe Kapitel 4). Hierbei wurde von den Produzenten u. a. erfragt, welche Techniken zur Aufbereitung von Holzhackschnitzeln Anwendung finden und in welcher Reihenfolge die Prozessschritte aufeinander folgen. Unterschieden wurde dabei in zwei potenzielle Sortimente für Anlagen nach der 1. BImSchV, wobei Sortiment 1 für den Einsatz in Feuerungen mit einer Anlagenleistung von ≤ 100 kW und Sortiment 2 für Feuerungen > 100 – 1.000 kW vorgesehen war.

Der Rücklauf zur Umfrage umfasste 91 verwertbare Datensätze. Die Daten wurden mit weiteren verfügbaren Informa-

tionsquellen (z. B. den im Jahr 2015 noch verfügbaren Marktübersichten des Kuratoriums für Waldarbeit und Forsttechnik e. V., KWF) verglichen.

7.1.1 Siebtechnik

Die zur Aufbereitung von Holzhackschnitzeln einsetzbaren Siebtechniken haben ihren Ursprung in der Sortierung von Gesteinen, im Recycling, der Futtermittelindustrie und der Kompostierung. In Deutschland werden Siebanlagen von mehreren nationalen und internationalen Anbietern eingesetzt. Unterschieden wird zunächst in stationäre und in mobile Siebanlagen. Mobile Siebanlagen sind vor allem Trommel- und Sternsiebe. Stationäre Siebanlagen sind vor allem Plan- und Schwingsiebe, es kommen aber auch Stern- und Trommelsiebe zum Einsatz.

Die Ergebnisse der projektbezogenen Marktanalyse zeigen, dass die Siebung als Aufbereitungsschritt in der Praxis eine eher untergeordnete Rolle spielt. Nur ungefähr ein Drittel der Befragten siebte die Sortimente im Jahr 2015 tatsächlich (siehe Abbildung 7.1). Hierbei kamen vor allem Schwingsiebe zum Einsatz. Daneben wurden die Brennstoffe mit Trommel- und Sternsieben aufbereitet (siehe Abbildung 7.2).

Schwingsiebe: Schwingsiebe werden nicht nur häufig für die Siebung von Gesteinen, sondern auch in der Recycling-, Futter-



Mobiles Trommelsieb an einem Biomassehof

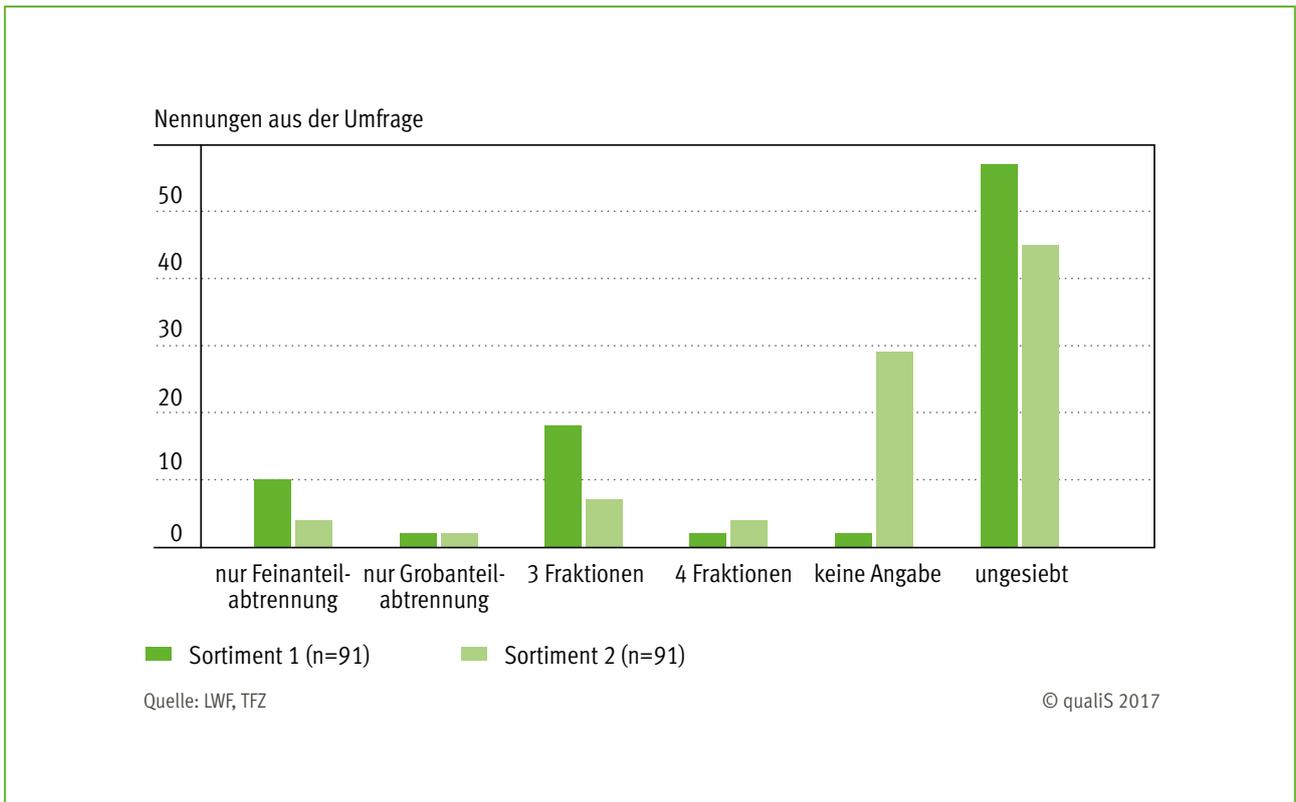


Abbildung 7.1: Anzahl an Siebfractionen bei der Aufbereitung von Holzhackschnitzeln für Anlagen nach 1. BImSchV (Sortiment 1 für Feuerungen ≤ 100 kW, Sortiment 2 für Feuerungen > 100–1.000 kW, Ergebnisse aus einer Produzentenumfrage im Jahr 2015)

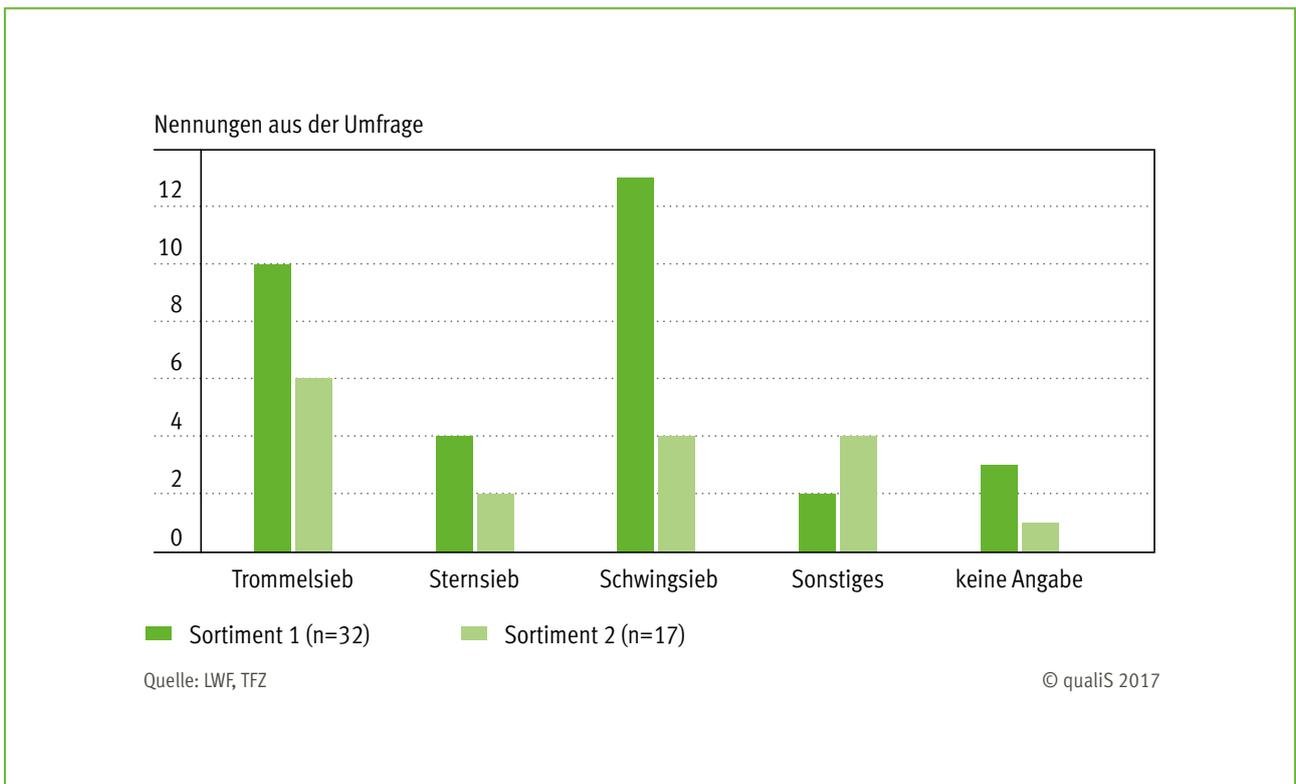


Abbildung 7.2: In der Praxis verwendete Siebtechniken zur Aufbereitung von Holzhackschnitzeln für Anlagen nach 1. BImSchV (Sortiment 1 für Feuerungen ≤ 100 kW, Sortiment 2 für Feuerungen > 100–1.000 kW, Ergebnisse aus einer Produzentenumfrage im Jahr 2015)

mittel- und Holzindustrie verwendet. Meist sind die Anlagen fest in einer Aufbereitungskette verbaut. In Schwingsieben können i. d. R. mehrere Siebelemente übereinander integriert werden, sodass gleichzeitig mehrere Fraktionen abgesiebt werden. Durch einen Wechsel der Siebelemente kann die Zielgröße der Fraktionen ausgewählt werden. Häufig wird das Material über eine Förderanlage aus einem vorgelagerten Bunker transportiert und gleichmäßig auf den obersten Siebkorb verteilt. Durch Schwingbewegungen der Siebelemente fallen die verschiedenen Partikel je nach Größe durch die einzelnen Siebstufen. Über Förderbänder werden die Partikel danach aus den jeweiligen Siebstufen abtransportiert [7-1].

Trommelsiebe: Trommelsiebe finden in vielen Bereichen Verwendung. Sie sind z. B. zur Siebung von Kompost und Boden, aber auch von Biomasse und Holzhackschnitzeln einsetzbar. Der Markt bietet eine große Spannweite an verschiedenen Größen und Ausführungen (z. B. auch mit mehreren integrierten Trommeln). Die Siebfläche reicht von 10 m² bei kleinen, mobilen Anlagen bis zu über 50 m² bei großen, stationären Sieben. Die Siebe verfügen ebenfalls meist über einen Bunker, in den das zu siebende Material eingefüllt wird. Dieses rutscht durch eine leichte Neigung der Trommel oder mittels einer integrierten Förderanlage (z. B. Schneckenbahnen) Richtung Trommelende. Durch die Rotation der Trommel werden je nach Lochweite verschiedene Fraktionen ausgesiebt und über Förderbänder ausgetragen. Die Siebgeschwindigkeit kann mehrstufig geregelt werden. Um verschiedene Siebfraktionen zu erhalten, ist bei manchen Modellen das Austauschen der Trommeln notwendig. Die Siebe können ohne größeren Aufwand mit einem Radlader gewechselt werden [7-1].

Sternsiebe: Mit Sternsieben können neben Bauschutt, Kompost und Boden auch Biomasse und Holzhackschnitzel gesiebt werden. Sowohl stationäre als auch mobile Siebanlagen sind verbreitet. Das Material wird entweder in den Bunker der Maschine oder direkt auf das Sieb gefüllt und fällt auf waagrecht angeordnete Wellen, die mit sternförmigen Scheiben besetzt sind, welche durch Drehbewegungen das Material auflockern. Die Überlängen bleiben auf den Wellen liegen und wandern seitwärts, wo sie aus der Siebeinheit fallen. Wenn mehrere Fraktionen ausgesiebt werden sollen, fällt das Material zwischen den Sternen der ersten Ebene hindurch auf ein zweites Sternsieb. Hier fällt dann die nächstfeinere Fraktion wiederum hindurch. Die Holzhackschnitzel werden durch die Drehbewegung der Sterne weitertransportiert und fallen am Ende des Siebes aus der Maschine. Dort, wo die Fraktionen aus der Siebeinheit ausgetragen werden, wird i. d. R. ein Förderband installiert, um das Material direkt wegzubefördern [7-1].

7.1.2 Trocknungstechnik

Neben der Siebtechnik wurden im Rahmen der Marktanalyse auch Fragen zur Trocknungstechnik gestellt. Dabei hat sich gezeigt, dass sowohl die natürliche als auch die technische Trocknung eine große Rolle in der Aufbereitung von Holzhackschnitzeln spielen (siehe Abbildung 7.3). Das Vorgehen bei der natürlichen Trocknung wurde bereits in Kapitel 6.2 erläutert.

Bei der technischen Trocknung spielt vor allem die Satz-trocknung in mobilen Trocknungscontainern in der Praxis eine große Rolle (siehe Abbildung 7.4). Daneben kommen u. a. auch kontinuierlich laufende Band-, Trommel- und Wälzbett-trockner sowie stationäre Satz-trockner zum Einsatz. Unabhängig von der Trocknungsart erfolgt die technische Trocknung der Holzhack-

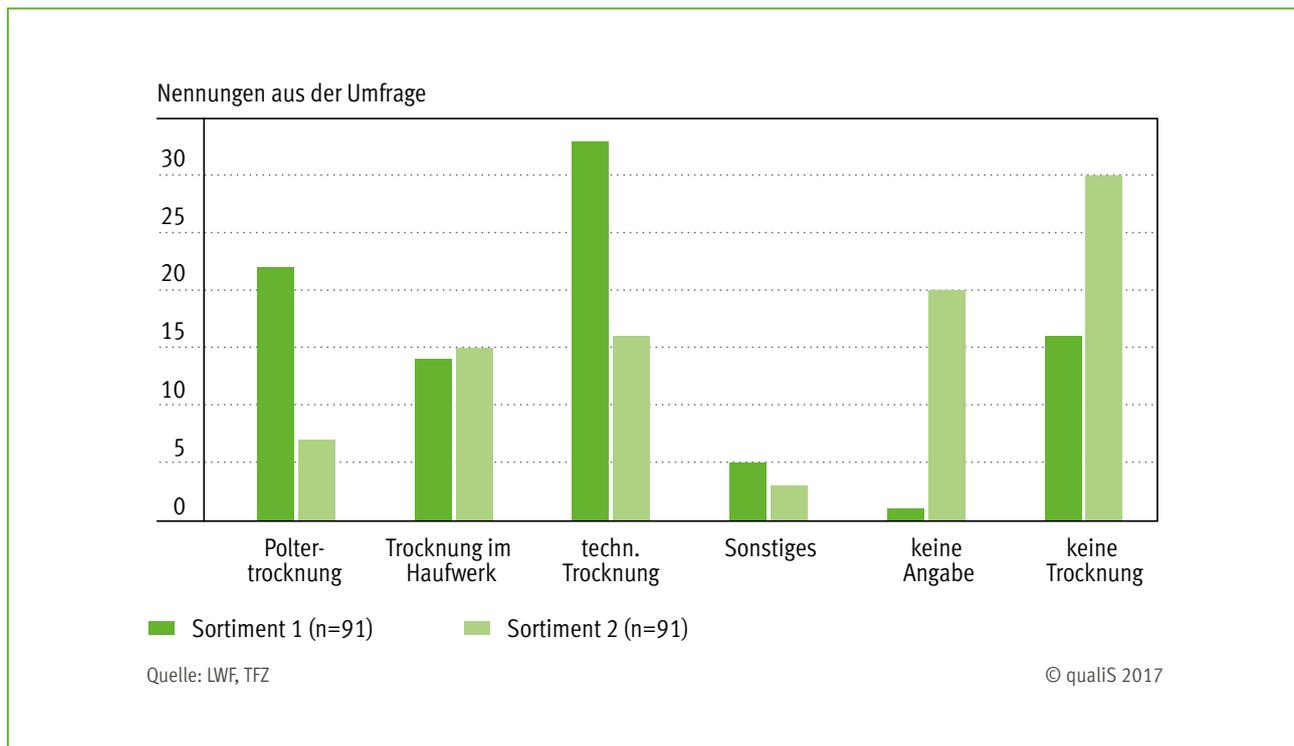


Abbildung 7.3: Häufig verwendete Trocknungstechniken zur Aufbereitung von Holzhackschnitzeln für Anlagen nach 1. BlmSchV (Sortiment 1 für Feuerungen ≤ 100 kW, Sortiment 2 für Feuerungen $> 100-1.000$ kW, Ergebnisse aus einer Produzentenumfrage im Jahr 2015)

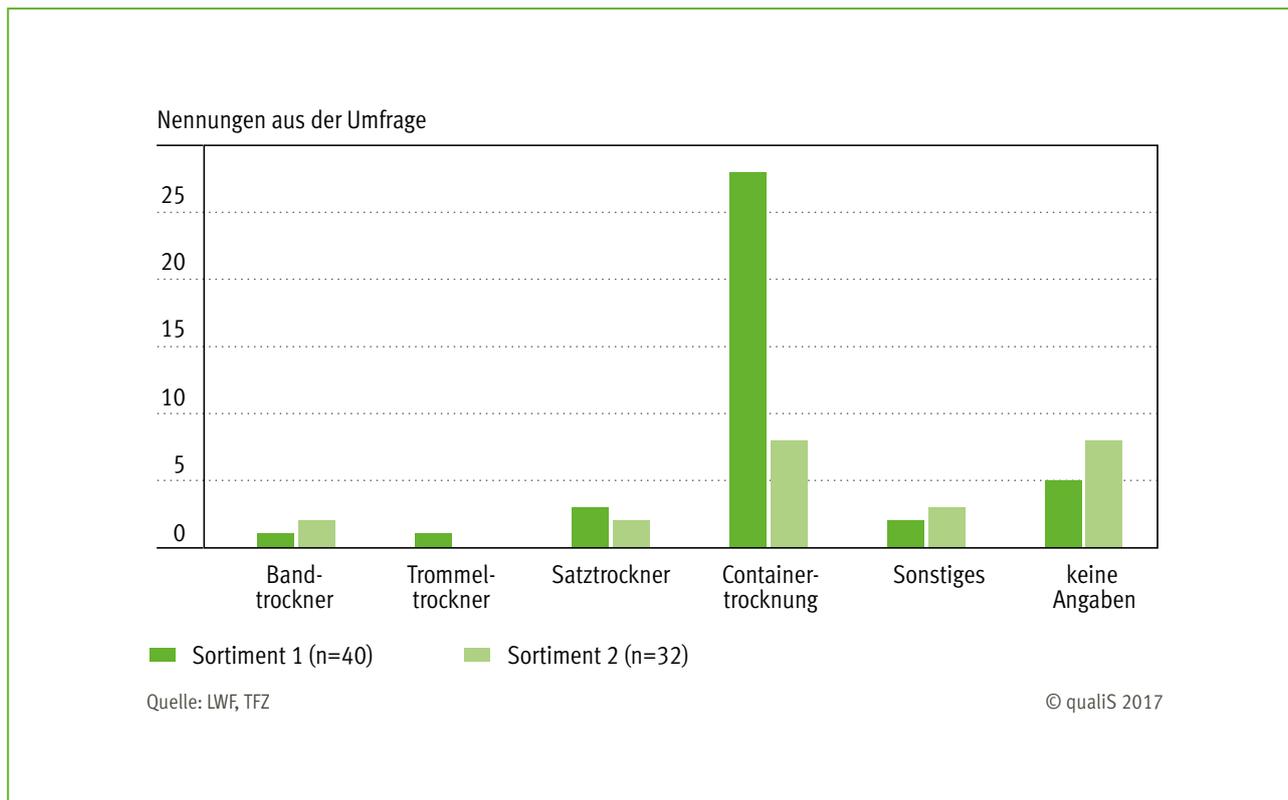


Abbildung 7.4: Häufig verwendete technische Trocknungsverfahren zur Aufbereitung von Holzhackschnitzeln für Anlagen nach 1. BImSchV (Sortiment 1 für Feuerungen ≤ 100 kW, Sortiment 2 für Feuerungen > 100–1.000 kW, Ergebnisse aus einer Produzentenumfrage im Jahr 2015)

schnitzel häufig unter Zufuhr von warmer, trockener Luft (z. B. Abwärme aus Biogasanlagen).

Die wichtigsten Techniken unterscheiden sich in kontinuierliche Verfahren, die im bewegten Gutstrom trocknen, und in Batch-Verfahren, die unbewegtes Material belüften. Kontinuierliche Trocknungsverfahren sind dabei in der Anschaffung meist teurer, ermöglichen aber i. d. R. eine kontrolliertere Trocknung auf einen gewünschten Zielwassergehalt und eine bessere Brennstoffhomogenität.

Satz-trockner: In der Praxis sind Satz-trockner weit verbreitet. Bei diesen befindet sich das Trocknungsmaterial in Ruhe und wird meist von unten, in Einzelfällen auch seitlich mit warmer Luft durchströmt und so getrocknet. Bei vielen Anlagen befindet sich das Trocknungsmaterial in speziellen Behältern, z. B. angepassten Transportcontainern. In diese ist mehrere Zentimeter über dem Boden ein Lochblech eingebaut, auf dem die Holzhackschnitzel liegen. Über Anschlüsse in der Rückwand der Container werden sie mit der Wärmequelle verbunden. Dabei kann es sich um speziell erzeugte Wärme oder um Abwärme z. B. aus Biogasanlagen handeln. Die Wärme wird über ein Gebläse und flexible Schläuche in die Belüftungsräume der Container gepresst. Neben kommerziell angebotenen Containern bauen sich einige Hackschnitzelproduzenten auch reguläre Hakenliftcontainer nach ihren Vorstellungen zu Trocknungscontainern um. Daneben finden sich in der Praxis auch fest verbaute Satz-trocknerboxen [7-1].



Trocknungscontainer angeschlossen an ein Gebläse

Band-trockner: Band-trockner trocknen kontinuierlich im bewegten Materialstrom. Dabei wird das Trocknungsmaterial dünn auf ein luftdurchlässiges Band gegeben. Warme Luft durchströmt das Band, wobei es zum Trocknungsvorgang kommt. Am Ende des Bands wird der Wassergehalt i. d. R. automatisch und kontinuierlich, z. B. kapazitiv, mittels Infrarot oder über die Luftfeuchte in der Abluft bestimmt. Die Trocknungszeit kann über die Geschwindigkeit des Bandes, die Wärme der Luft und die Gebläseleistung geregelt werden. Diese Art der Trocknung eignet sich vor allem für große Durchsätze und niedrigere Temperaturen (75–110 °C) [7-1].



Bandrockner erreichen teilweise große Dimensionen

Wälzbettrockner: Auch Wälzbettrockner gehören zu den kontinuierlichen und mit bewegtem Material arbeitenden Trocknungsverfahren. Im Inneren des Trockners befindet sich ein Rührwerk, welches die Holzhackschnitzel durch den Trockner schiebt und dabei gleichzeitig durchmischt. So wird für eine gleichmäßige Verteilung und Trocknung gesorgt. Die Zuluft wird mit einem Gebläse in den Trockner geleitet. Die Abluft wird abgesaugt. Die Verweilzeit der Holzhackschnitzel im Trockner wird unter anderem von der zugeführten Wärmeleistung und der Zuführungsgeschwindigkeit der Holzhackschnitzel bestimmt. Der Wassergehalt wird auch beim Wälzbettrockner i. d. R. automatisch und regelmäßig, z. B. kapazitiv oder mittels Infrarot gemessen [7-1].

Trommelrockner: Bei Trommelrocknern wird das Trocknungsmaterial im Inneren einer rotierenden, leicht geneigten Trommel mit Luft getrocknet. Hubschaufeln sorgen dafür, dass das Material immer wieder durchmischt wird. Die Verweilzeit im Trockner ist unter anderem abhängig von der Drehzahl der Trommel und deren Neigung, aber auch von der Strömungsgeschwindigkeit der Trocknungsluft. Der Wassergehalt kann je nach Ausführung des Trockners ebenfalls über Sensoren (z. B. kapazitiv oder mittels Infrarot) gemessen werden.

Es gibt noch weitere Techniken, die vereinzelt zur Trocknung von Holzhackschnitzeln eingesetzt werden. Eine Variante der Satzrocknung ist z. B. die sogenannte Solartrocknung. Die Holzhackschnitzel werden auf Lochblechböden unter Dach gelagert. Die Luft wird mit Sonnenenergie über spezielle Kollektoren erwärmt und strömt von unten durch die Holzhackschnitzel, wodurch diese getrocknet werden.

7.2 Fallstudien zur Hackschnitzelaufbereitung

Im Rahmen des Projekts „qualiS“ wurde in sechs Fallstudien frisch gehacktes Waldrestholz durch typische Siebungs- und Trocknungsverfahren aufbereitet (siehe Tabelle 7.1). Die Wahl der Prozessketten erfolgte dabei anhand der Ergebnisse der Marktanalyse (Kapitel 7.1). Die Aufnahmen fanden bei ausgewählten Hackschnitzelproduzenten statt.

In jeder Fallstudie wurden drei Aspekte untersucht:

- die Qualitätsverbesserung während der Aufbereitung,
- das Emissionsverhalten der aufbereiteten Holzhackschnitzel in Kleinfeuerungsanlagen und
- die Produktionskosten der Aufbereitungsschritte.

Tabelle 7.1: Fallstudien im Projekt qualiS

Fallstudie	Trocknung	Siebung
1	Wälzbett-Trockner	Sternsieb/Schwingsieb
2	Containertrocknung	Sternsieb
3	Trocknung im Haufwerk	Trommelsieb
4	Schubbodentrockner	–
5	Trocknung im Haufwerk	Sternsieb
6	Bandrockner	Schwingsieb/Trommelsieb

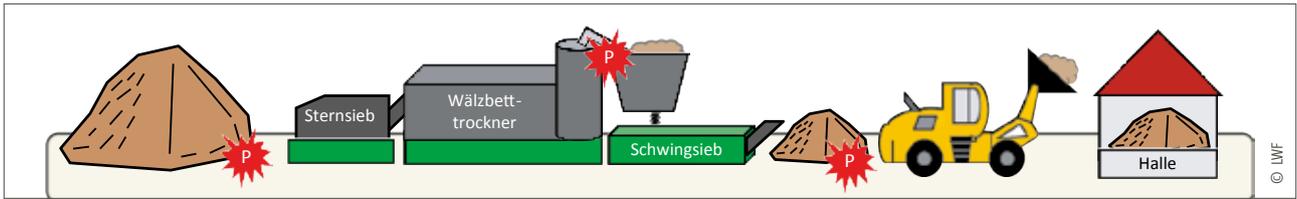
Alle Ausgangsmaterialien sowie die Zwischen- und Endprodukte wurden beprobt und nach DIN EN ISO-Normen für biogene Festbrennstoffe analysiert (siehe Tabelle 7.2). Obwohl die Aufnahmen im Projekt „qualiS“ bereits im Jahr 2016 erfolgten, wurden die Ergebnisse für die Neuauflage des Handbuchs mit den Klassifikationen und Brennstoffspezifikationen der novellierten DIN EN ISO 17225-4 aus dem Jahr 2021 verglichen (siehe Kapitel 5) [7-3]. Gleichzeitig wurden Brennstoffproben für die Analyse des Emissionsverhaltens in kleinen Hackschnitzelfeuerungen gewonnen (siehe Kapitel 8). Als Ausgangsmaterial kamen bei jeder Fallstudie Holzhackschnitzel aus Waldrestholz zum Einsatz.

Tabelle 7.2: Analytierte Brennstoffparameter inklusive Analyseverfahren

Parameter/Eigenschaftsklasse	Abkürzung, Einheit und Probenzahl je Verfahrensschritt	DIN EN ISO
Wassergehalt	M in m-%, n ≥ 10	18134-2/3
Aschegehalt	A in m-%, wf, n = 3	18122
Heizwert	Q in MJ/kg, wf, n = 3	18125
Partikelgrößenverteilung	in m-%, n = 10	17827-1
Feinanteil	F in m-%, n = 10	17827-1
Schüttdichte	BD in kg/m ³ , n = 10	17828
Gesamtgehalt an C, H, N	in m-%, wf, n = 1*	16948
Gehalt an Cl, S	in m-%, wf, n = 3	16994
Hauptbestandteile	in mg/kg, wf, n = 1*	16967
Spurenelemente	in mg/kg, wf, n = 1*	16968

* Mischung aus drei Biomasseproben
wf = wasserfrei

Die Proben wurden während des laufenden Produktionsprozesses gewonnen. Neben der Brennstoffbeurteilung erfolgte die Ermittlung der Durchsatzleistung je Verfahrensschritt über Zeitstudien. Weitere Betriebskosten und -verbräuche (z. B. Brennstoffkosten, Personal, Maschinen, Strom, Wärme, Kraftstoff) wurden gemessen bzw. von den Betreibern erfragt. Zusätzliche wichtige Parameter waren die jährliche Auslastung der Maschinen sowie die Kosten für die Abschreibung und die maximale Nutzungsdauer. Darauf aufbauend wurde für jeden Aufbereitungsschritt und die damit zusammenhängenden Prozesse eine Berechnung der Produktionskosten (mit Bezug auf die produzierte Holzhackschnitzelmenge) durchgeführt. Hier-



Prozess- und Aufbereitungsschritte sowie Probenahmepunkte („P“) der Fallstudie 1

für wurden in der Studie Energieverbrauchskosten (Strom- und Kraftstoffpreise) sowie Personal- und Investitionskosten aus dem Aufnahmejahr 2016 angesetzt. Aktuelle Kosten können hiervon abweichen.

Die dargestellten Kosten beziehen sich nicht auf den langfristigen Erfolg der beteiligten Unternehmen, sondern explizit auf die in den Fallstudien aufbereitete Charge. Ebenso lassen die ermittelten qualitativen Eigenschaften keine Aussage über die Brennstoffqualität der Unternehmen im Jahresverlauf zu.

7.2.1 Fallstudie 1: Gekoppelte Aufbereitung mittels Wälzbettrockner und Schwingsieb

Verfahrensbeschreibung: Fallstudie 1 wurde an einer Betriebsstätte in Oberbayern/Bayern durchgeführt, deren Betriebskonzept allein die Produktion von hochwertigen Holzhackschnitzeln ist. Der Betriebshof verfügt über eine Lagerhalle und eine Produktionshalle mit einer Gesamtfläche von rund 1.900m², einen befestigten Lagerplatz von rund 900m² und eine Lkw-Waage. Die Abnehmer sind meist kommunale oder gewerbliche Betriebe mit Anlagenleistungen bis zu 1.000kW. Es werden Holzhackschnitzel, die vollständig aus Sägerestholz oder Energierundholz bestehen, sowie Holzhackschnitzel, die aus einem Gemisch von Nadel- und Laubwaldrestholz produziert werden, zu jeweils einem Sortiment aufbereitet.

Sieben (Überlängen), Trocknen und Sieben (Feinanteil) (siehe Tabelle 7.3). Die Wärme für den Trockner wird von einer nahegelegenen Biogasanlage bezogen. Insgesamt läuft die Anlage nahezu ganzjährig 24 Stunden am Tag. Die gesamte Produktionszeit beträgt ca. 8.000 Stunden pro Jahr. Für das Bedienen der Aufbereitungsanlage benötigt ein Angestellter rund vier Stunden pro Tag.

Für die Aufbereitung werden Holzhackschnitzel aus der Region betriebsextern produziert, angeliefert, vor Ort gewogen und anschließend auf dem Lagerplatz abgeladen. Mit einem Radlader werden die Holzhackschnitzel auf einen Schubboden geschoben. Dieser befördert die Holzhackschnitzel über ein Förderband zum Trockner. Bevor die Holzhackschnitzel am Trockner ankommen, werden die Überlängen über ein Sternsieb (Backers) aussortiert (Prozessschritt 1). Die nicht getrockneten Überlängen werden gesammelt und als Brennstoff an größere Heizkraftwerke verkauft (Nebenprodukt 1). Die verbleibenden Holzhackschnitzel werden in einem Wälzbettrockner (Allgaier, Modell WB-T) getrocknet (Prozessschritt 2). Im Inneren des Trockners befindet sich ein Rührwerk zum Transport der Holzhackschnitzel, dass diese gleichzeitig vermischt und so für eine gleichmäßigere Verteilung im Trockner und eine bessere Trock-

Tabelle 7.3: Steckbrief zu Fallstudie 1

Eingesetzte Maschinen/Prozesseinstellungen	
Prozessschritt 1: Siebung	Sternsieb Backers
Prozessschritt 2: Trocknung	Wälzbettrockner Allgaier WB-T
Prozessschritt 3: Siebung	Schwingsieb S & F GmbH ASS 100
Wärmequelle	Biogasanlage
Kopplungsgrad	alle Prozessschritte miteinander gekoppelt
Ausgangs- und Endprodukte	
Ausgangsmaterial	frische Waldrestholzhackschnitzel/ frische Sägerestholzhackschnitzel
Hauptprodukt	getrocknete und gesiebte Holzhackschnitzel
Nebenprodukt 1	Überlängen (> 28 mm)
Nebenprodukt 2	Staubfraktion (≤ 1,5 mm)
Nebenprodukt 3	Feinanteil (< 6 mm)

Als Ausgangsmaterial für Fallstudie 1 wurden Waldrestholzhackschnitzel aus Nadelholz verwendet. Der Aufbereitungsprozess besteht aus drei aneinandergeschlossenen Schritten:



Allgaier Wälzbettrockner WB-T mit Zyklon (oben) und Backers Schwingsieb (unten)

nung sorgt. Die Zuluft (ca. 70°C) wird mittels Gebläse von unten in den Trockner geleitet. Die gesättigte Luft wird von oben abgesaugt. Die Staubfraktion in der Abluft wird durch einen Zyklon abgeschieden und gemeinsam mit den Holzhackschnitzeln in den Siebprozess geführt.

Der Zielwassergehalt der Trocknung liegt bei max. 15 m-%. Der Trocknungsfortschritt wird über die Lufttemperatur und die Messung des Wassergehalts geprüft. Dafür befindet sich ein Feuchtesensor am Materialauslass des Trockners und je ein Temperatursensor im Zuluft- und Abluftkanal. Über ein Förderband werden die Holzhackschnitzel zu einem Schwingsieb (S&F GmbH, Modell ASS 100, Prozessschritt 3) geleitet. Im Sieb werden die Holzhackschnitzel in drei Fraktionen gesiebt. Die feinste Fraktion (Partikelgröße < 1,5 mm) stellt Nebenprodukt 2 dar und wird, da sie große saugfähige und geruchsbindende Eigenschaften hat, i. d. R. als Einstreu für die Nutztierhaltung verkauft. Der Anteil feiner, aber nicht staubförmiger Partikel (Partikelgröße > 1,5 bis < 6 mm, Nebenprodukt 3) wurde ursprünglich briquettiert, wird mittlerweile aber ebenfalls ungespresst als Einstreu an Viehbetriebe vermarktet. Die hochwertigen Holzhackschnitzel (Hauptprodukt) werden nach dem Sieb über ein Förderband in eine separate Halle (Zwischensammelstelle) befördert und mit einem Radlader in Lagerhallen transportiert und dort bis zum Verkauf untergebracht oder direkt per Lkw zum Kunden gefahren. Es entstehen während des gesamten Aufbereitungsprozesses somit vier vermarktungsfähige Produkte (Holzhackschnitzel sowie Nebenprodukte 1 bis 3).

Tabelle 7.4: Brennstoffqualität in Fallstudie 1 (wf = wasserfrei, ar = im Anlieferungszustand [engl. „as received“])

Parameter/Eigen-schaftsklasse	frisches Ausgangsmaterial	getrocknet	trocken gesiebt
Brennstoff-Nr.	1-A	1-T	1-E
M (m-%)	41,7	12,6	12,8
M _{max-min} (m-%)	2,9	2,8	2,9
A (m-%, wf)	3,0	2,1	1,4
Q (MJ/kg, wf)	19,21	18,99	19,20
Q (MJ/kg, ar)	10,18	16,29	16,43
BD (kg/m ³ , ar)	314	263	252
F (m-%)	15,3	10,7	2,5
P-Klasse nach DIN EN ISO 17225-4 (2021)	P31	P16	P16 P45s
N (m-%, wf)	0,32	0,25	0,23
S (m-%, wf)	0,02	0,01	0,01
Cl (mg/kg, wf)	66	54	58
K (mg/kg, wf)	1.320	1.090	970
Si (mg/kg, wf)	5.250	1.630	780
Σ (K, Na, Pb, Zn) (mg/kg, wf)	1.440	1.170	1.030
Klassifikation nach DIN EN ISO 17225-4 (2021)	–	B1	A1

Zur innerbetrieblichen Qualitätssicherung werden regelmäßig Proben der Holzhackschnitzel bei Anlieferung und der produzierten Holzhackschnitzel am Betriebshof mithilfe eines Darr-ofens auf ihren Wassergehalt analysiert. Proben für die Analyse weiterer Qualitätsparameter (Aschegehalt, Heizwert, Partikelgrößenverteilung) werden im regelmäßigen Turnus in externen Laboren untersucht.

Brennstoffqualität: Die Brennstoffqualität des Ausgangsmaterials lag im typischen Bereich für Waldrestholzhackschnitzel aus Nadelholz (siehe Tabelle 7.4) [7-4]. Lediglich der Wassergehalt von 41,7 m-% deutet darauf hin, dass die Holzhackschnitzel nicht mehr komplett waldfresh waren, sondern bereits eine gewisse Trocknung eingesetzt hatte. Eine Einordnung in die „Ps-Klassen“ (P16s, P31s und P45s) nach DIN EN ISO 17225-4 (2021) war vor der Aufbereitung aufgrund eines hohen Feinanteils nicht möglich. Die Holzhackschnitzel hatten eine Partikelgröße P31. Aufgrund des Aschegehalts > 1,5 m-% und eines gleichzeitig hohen Wassergehalts > 35 m-% ist eine Klassifikation der Qualität nach DIN EN ISO 17225-4 (2021) nicht möglich.

Die Aufbereitung mittels Wälzbettrockner führte zu einer Reduzierung des Wassergehaltes auf 12,6 m-%. Aufgrund des kontinuierlichen und kontrollierten Trocknungsverfahrens kam es nach dem Wälzbettrockner nur zu sehr geringen Schwankungen im Wassergehalt (M_{max-min}). Gleichzeitig reduzierten sich beim Trocknen schon in geringem Maß der Aschegehalt, der Feinanteil und der Anteil an verbrennungskritischen chemischen Elementen. Dies ist auf den Austrag an feinen Staubpartikeln bei der Absaugung der gesättigten Trocknerluft zurückzuführen. Die anschließende Siebung mittels Schwingsieb führte



Waldrestholz hackschnitzel vor (oben) und nach (unten) der Aufbereitung in Fallstudie 1. Größe des Bildausschnittes ca. DIN A5

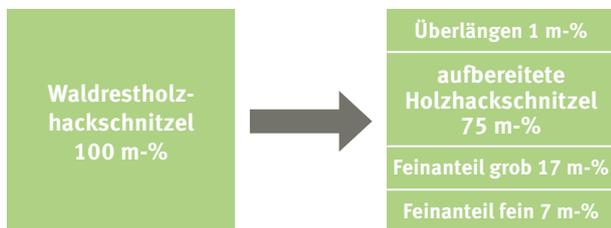
zu einer deutlichen Reduzierung des Aschegehalts (1,4 m-%), des Feinanteils (2,5 m-%) sowie der verbrennungskritischen Elemente. Durch die Reduzierung des Aschegehalts < 1,5 m-%, des Wassergehalts < 25 m-% und durch konsequente Einhaltung der Partikelgrößen P31s war für die aufbereiteten Holzhackschnitzel eine deutliche Verbesserung der Brennstoffqualität zu beobachten. Die aufbereiteten Holzhackschnitzel konnten der Klassifikation A1 nach DIN EN ISO 17225-4 (2021) zugeordnet werden.

Tabelle 7.5: Produktionskosten in Fallstudie 1

Prozessschritte	€/t _{atro}
1 Siebung Überlängen (Sternsieb)	1,41
2 Trocknung (Wälzbettrockner)	31,14
3 Siebung Feinanteil (Schwingsieb)	0,57
sonstige Kosten	20,80
Produktionskosten	53,92
bezogen auf Endprodukt	47,04 €/t (M = 12,8 m-%)

Produktionskosten: Im untersuchten Betrieb sind die Sieb- und Trocknungsschritte direkt aneinandergeschaltet und über Förderbänder und -schnecken automatisiert miteinander verbunden. Die Durchsatzleistung gilt daher für alle beteiligten Maschinen. Sie lag bei 0,64 t_{atro}/h und wurde maßgeblich von der Produktivität beim Trocknen bestimmt, die eingesetzten Siebmaschinen hätten einen höheren Durchsatz erlaubt. Der Wälzbettrockner ist die Maschine mit den höchsten Investitionskosten im Betriebskonzept. Das Trocknen stellte entsprechend mit 31,14 €/t_{atro} den größten Anteil an den Produktionskosten dar (siehe Tabelle 7.5).

Das Aussieben der Überlängen mittels Sternsieb kostete 1,41 €/t_{atro}. Das Aussieben des Feinanteils mit dem Schwingsieb war etwas günstiger und belief sich auf 0,57 €/t_{atro}. Da die Fördereinrichtungen im gekoppelten Prozess nicht vollständig einem Prozessschritt zugeordnet werden können, wurden die anfallenden Kosten in Höhe von 8,13 €/t_{atro} zu den sonstigen Kosten gerechnet. Hierunter fielen außerdem Lohnkosten und Kosten für den Betriebshof in Höhe von 12,67 €/t_{atro}. Der angegebene Betreuungsaufwand kann (gemessen an der hohen



Verteilung der Haupt- und Nebenprodukte aus Fallstudie 1 (bezogen auf die Trockenmasse)

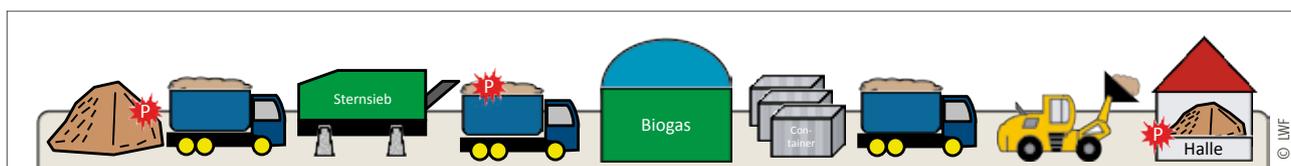
Auslastung) als relativ gering bezeichnet werden. Dies hängt direkt mit dem hohen Automatisierungsgrad zusammen. Insgesamt wurden in der Fallstudie Produktionskosten in Höhe von 53,92 €/t_{atro} ermittelt. Bezogen auf das Endprodukt mit einem Wassergehalt von 12,8 m-% entspricht dies 47,04 €/t (M=12,8). Die Aufbereitung funktionierte dabei sehr effektiv. Neben dem Absatz der hochwertigen Holzhackschnitzel ist die Vermarktung der Nebenprodukte ein wichtiger Aspekt für den Betriebserfolg: Der Anteil der als Tierstreu nutzbaren Feinfraktionen machte knapp ein Viertel der gesamten Produktion (24,1 m-%) aus.

7.2.2 Fallstudie 2: Entkoppelte Aufbereitung mittels Containertrocknung und Sternsieb

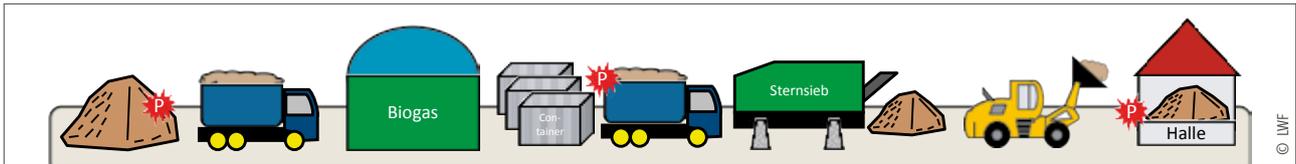
Verfahrensbeschreibung: Fallstudie 2 wurde in einem Betrieb in Schwaben/Bayern durchgeführt, der sich mit der Aufbereitung von Biomasse beschäftigt. Hauptgeschäftsfeld ist die Kompostierung, aber auch die Aufbereitung von Holzhackschnitzeln gehört zum Tagesgeschäft. Zudem hat der Betrieb weitere Vermarktungsschienen für die dabei entstehenden Nebenprodukte. So wird ein Teil der Holzhackschnitzel als Fallschutz für Spielplätze verwendet. Jährlich werden in diesem Betrieb rund 200.000 m³ Biomasse aufbereitet. Die Abnehmer sind hauptsächlich gewerbliche Anlagen (70%) mit Anlagenleistungen > 1.000 kW. Allerdings gibt es auch ca. 10% private und 20% kommunale Abnehmer mit Anlagen zwischen 300–1.000 kW. Kunden mit Anlagen < 100 kW werden nur vereinzelt und mit dem hochwertigsten Hackschnitzelsortiment beliefert. Vor allem Holzhackschnitzel aus Sägereistholz werden hierfür aufbereitet, aber auch Holzhackschnitzel aus Waldrestholz und

Tabelle 7.6: Steckbrief zu Fallstudie 2

Eingesetzte Maschinen/Prozesseinstellungen	
Variante 2a	
Prozessschritt 1: Siebung	Sternsieb Komptech Multistar
Prozessschritt 2: Trocknung	externe Lohn-trocknung in Containern
Variante 2b	
Prozessschritt 1: Trocknung	externe Lohn-trocknung in Containern
Prozessschritt 2: Siebung	Sternsieb Komptech Multistar
Wärmequelle	Biogasanlage
Kopplungsgrad	alle Prozessschritte entkoppelt
Ausgangs- und Endprodukte	
Rohmaterial	frische Waldrestholz-hackschnitzel
Hauptprodukt	getrocknete und gesiebte Holz-hackschnitzel
Nebenprodukt 1	Überlängen (> 45 mm)
Nebenprodukt 2	Feinanteil (< 20 mm)



Aufbereitungsprozess und Probenahmepunkte („P“) der Fallstudie 2: (Variante 2a: Siebung frischer Holzhackschnitzel, danach Trocknung)



Aufbereitungsprozess und Probenahmepunkte („P“) der Fallstudie 2 (Variante 2b: Trocknung, danach Siebung)

Landschaftspflegematerial. Für die Aufbereitung und Lagerung stehen rund 3.000m² Hallenfläche und rund 3.000m² Lagerplatz auf dem Gelände der Firma zur Verfügung. Der Aufbereitungsprozess besteht aus zwei entkoppelten Prozessschritten (siehe Tabelle 7.6). Die Holzhacksnitzel werden auf dem Betriebshof in drei Fraktionen gesiebt (Prozessschritt 1) und danach in Containern an einer Biogasanlage mit Abwärme als externe Dienstleistung getrocknet (Prozessschritt 2).

Das Unternehmen kauft Sägerestholz bei Sägewerken und transportiert es mit eigenen Lkw zum Betriebshof. Waldrestholz und Landschaftspflegeholz werden frei Waldstraße bzw. am Ort des Anfalls gekauft, mit dem betriebseigenen Hacker gehackt und von den betriebseigenen Lkw zum Betriebshof transportiert. Dort werden die Holzhacksnitzel mit einer stationären Sternsiebmaschine (Komptech; Modell Multistar) in drei Fraktionen gesiebt (Prozessschritt 1). Bei der Siebung entstehen folgende Produkte: Überlängen > 45 mm (Nebenprodukt 1), Feinanteil < 20 mm (Nebenprodukt 2) und die gesiebten Holzhacksnitzel (Hauptprodukt). Nach dem Sieben werden die

Holzhacksnitzel in selbst umgebaute Trocknungscontainer gefüllt und zur externen Trocknung an eine Biogasanlage transportiert. Die Container sind Standard-Lkw-Container, in die ein Lochblech-Zwischenboden eingeschweißt wurde. Zudem wurden zwei standardisierte Öffnungen in die Rückwand geschnitten, um die Container an ein Gebläse anschließen zu können. Die Container bleiben je nach Wassergehalt der Holzhacksnitzel 3–5 Tage angeschlossen, um einen Zielwassergehalt von ca. 15 m-% zu erreichen.

Als Variante wurde die Fallstudie zusätzlich mit umgekehrter Reihenfolge der Prozessschritte durchgeführt. Prozessschritt 1 war dabei die Trocknung und Prozessschritt 2 die Siebung.

Die getrockneten und gesiebten Holzhacksnitzel werden in eine Lagerhalle gebracht und dort bis zum Verkauf gelagert. Die Überlängen werden gesammelt und an große Heizwerke verkauft. Der Feinanteil ist durch seine Saugfähigkeit und Geruchsbindung ein interessantes Produkt als Einstreu für Pferdeboxen und wird daher lose oder in BigBags an Pferdehöfe im Umkreis von bis zu 200 km verkauft und geliefert. Somit entstehen während des gesamten Aufbereitungsprozesses drei vermarktungsfähige Produkte (Hauptprodukt und Nebenprodukte 1 und 2). Zur Bestimmung des Wassergehalts befindet sich auf dem Betriebshof ein Darrofen. In regelmäßigen Abständen wird



Containertrocknung (Satztrockner) mit Biogasabwärme (oben) und Siebung mittels Sternsieb (unten)



Waldrestholzhacksnitzel vor (oben) und nach (unten) der Aufbereitung aus Fallstudie 2 (Variante 2a). Größe des Bildausschnittes ca. DIN A5

der Wassergehalt des Hauptproduktes bestimmt. Andere Analysen werden vom Betrieb selbst nicht durchgeführt.

Brennstoffqualität: Das Ausgangsmaterial fiel vor allem durch einen im Vergleich zu typischem Waldrestholz (Nadelholz) erhöhten Aschegehalt von 7,4 m-% und einen etwas niedrigeren, wasserfreien Heizwert (18,5 MJ/kg) auf (siehe Tabelle 7-7) [7-2]. Auch der Siliziumgehalt war leicht erhöht. Ansonsten konnte das Ausgangsmaterial als typische Waldrestholzhackschnitzel eingeordnet werden. Eine Klassifizierung nach DIN EN ISO 17225-4 (2021) war nicht möglich.

Der hohe Aschegehalt des Ausgangsmaterials könnte neben hohen Anteilen an Nadeln und Rinde auf einen Eintrag von Mineralböden im Brennstoff zurückzuführen sein, wobei auch einzelne Steine im Brennstoff entdeckt wurden. Die erhöhten Siliziumgehalte deuten in dieselbe Richtung.

Die Aufbereitung der Holzhackschnitzel mittels Siebung (Prozessschritt 1) und anschließender Trocknung (Prozessschritt 2) wurde mit der Aufbereitung durch Trocknung (Prozessschritt 1) und anschließender Siebung (Prozessschritt 2) verglichen. Durch beide Kombinationen von Siebung und Trocknung konnte die Brennstoffqualität deutlich verbessert werden. Auffällig ist die durch die Siebung starke Reduzierung des Aschegehalts und des Feinanteils sowie der verbrennungskritischen Inhaltsstoffe. Dieser Effekt war deutlicher bei der Siebung bereits getrockneter

Holzhackschnitzel als bei der Siebung frischer Holzhackschnitzel, da im zweiten Fall feuchte Partikel noch aneinanderhaften und sich erst bei der anschließenden Trocknung voneinander lösen konnten. Die Siebung mittels Sternsieb reduzierte zudem den Anteil an Überlängen, wodurch die trocken gesiebten Holzhackschnitzel schlussendlich als P45s spezifiziert werden konnten. Dies war bei der Siebung frischer Holzhackschnitzel nicht der Fall, was sich aber auf die Einstellung des Sternsiebes (zu viele Überlängen durch zu langsam drehende Sternscheiben) und weniger auf den Unterschied frisch/getrocknet zurückführen lässt.

Die Trocknung bereits gesiebter Holzhackschnitzel führte zu geringfügig niedrigeren Wassergehalten (3,8 m-%) als die Trocknung ungesiebter Holzhackschnitzel (5,5 m-%). Grund hierfür könnten eine bessere Belüftung im Container durch ein höheres Porenvolumen bei gesiebten Brennstoffen, aber auch unterschiedliche Füllhöhen bzw. Trocknungsdauern sein. Interessanterweise nahm der Wassergehalt bei der Siebung bereits getrockneter Holzhackschnitzel wieder zu (13,2 m-%). Diese Zunahme lässt sich nur schwer erklären. Ursache könnte eine ungleiche Verteilung des Wassergehalts durch die Trocknung im Satzrockner sein. Auch könnte der Feinanteil aufgrund seiner geringeren Partikelgröße im Vergleich zu der Hauptfraktion deutlich schneller trocknen. Somit würde sich der Wassergehalt der verbleibenden Charge durch die Absiebung des Feinanteils wieder erhöhen. Eine Analyse des Wassergehalts von Feinanteil und Überlängen ergab jedoch mittlere Werte von 11,7 m-% und 11,8 m-%, weshalb diese These verworfen werden musste.

Insgesamt konnten die Holzhackschnitzel nach der Aufbereitung mittels Trocknung und anschließender Siebung in die Klassifikation B1 nach DIN EN ISO 17225-4 (2021) eingestuft werden. Limitierend für eine qualitativ höherwertige Klassifikation war der Aschegehalt mit 1,9 m-% bzw. 2.2 m-%.

Tabelle 7.7: Brennstoffqualität in Fallstudie 2 (wf = wasserfrei, ar = im Anlieferungszustand [engl. „as received“])

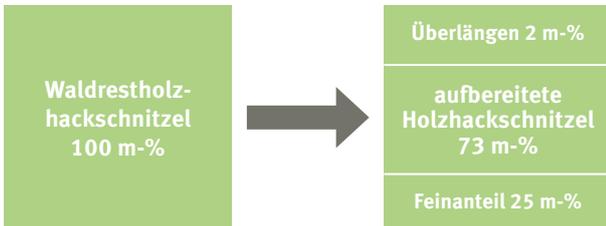
Parameter/ Eigenschafts- klasse	frisches Ausgangs- material	frisch gesiebt	gesiebt getrock- net	ungesiebt getrock- net	trocken gesiebt
Brennstoff-Nr.	2-A	2-S	2-E1	2-T	2-E2
M (m-%)	51,0	52,1	3,8	5,5	13,2
M _{max-min} (m-%)	10,0	1,8	0,6	4,2	8,0
A (m-%, wf)	7,4	3,7	2,5	2,2	1,9
Q (MJ/kg, wf)	18,53	19,02	19,30	19,00	19,05
Q (MJ/kg, ar)	7,84	7,84	18,48	17,82	16,25
BD (kg/m ³ , ar)	353	356	215	220	223
F (m-%)	17,7	10,80	9,1	11,62	2,6
P-Klasse nach DIN EN ISO 17225-4 (2021)	P45 -	P31 -	P31 -	P45 -	P31 P45s
N (m-%, wf)	0,47	0,35	0,33	0,29	0,20
S (m-%, wf)	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01
Cl (mg/kg, wf)	146	126	94	79	59
K (mg/kg, wf)	1.790	1.570	1.450	1.400	1.170
Si (mg/kg, wf)	18.750	8.520	5.050	3.720	2.250
Σ (K, Na, Pb, Zn) (mg/kg, wf)	2.090	1.750	1.560	1.510	1.240
Klassifikation nach DIN EN ISO 17225-4 (2021)	-	-	B1	B1	B1

Tabelle 7.8: Produktionskosten in Fallstudie 2

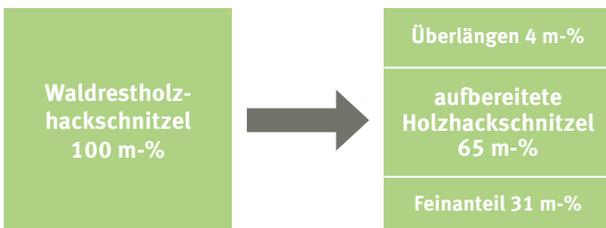
Prozessschritte Variante 2a	€/t _{atro}	Prozessschritte Variante 2b	€/t _{atro}
1 Siebung (Sternsieb)	1,12	1 Trocknung (Container)	26,86
2 Trocknung (Container)	26,86	2 Siebung (Sternsieb)	1,06
sonstige Kosten	4,32		4,15
Produktions- kosten	32,31	Produktions- kosten	32,07
bezogen auf Endprodukt	31,08 €/t (M = 3,8 m-%)	bezogen auf Endprodukt	27,88 €/t (M = 13,2 m-%)

Produktionskosten: Die einzelnen Prozessschritte in diesem Betrieb sind voneinander entkoppelt, d.h. sie laufen zeitlich und auch räumlich weitestgehend unabhängig voneinander ab. Die für das Sternsieb ermittelte Durchsatzrate bei der Prozessvariante 2a: „Siebung, danach Trocknung“ belief sich auf 19,8 t_{atro}/h. Damit betragen die Kosten für die Siebung 1,12 €/t_{atro} (siehe Tabelle 7.8). Bei der untersuchten Variante 2b „Trocknung, danach Siebung“ lagen die Durchsatzrate bei 21,0 t_{atro}/h und somit die Kosten für die Siebung bei 1,06 €/t_{atro}. Für die

Trocknung bei einem externen Biogasanlagenbetreiber fallen nach Aussage des Hackschnittelproduzenten pauschal 23,08 €/t_{atro} (inkl. Transport vom/zum Betriebshof) an. Zu den Trocknungskosten zählen auch die Kosten für die Container, die mit 3,78 €/t_{atro} veranschlagt wurden.



Verteilung der Haupt- und Nebenprodukte während der Aufbereitung in Fallstudie 2a (bezogen auf die Trockenmasse)



Verteilung der Haupt- und Nebenprodukte während der Aufbereitung in Fallstudie 2b (bezogen auf die Trockenmasse)

Die sonstigen Kosten setzen sich aus Maschinenkosten (Radlader und Lkw) und dem Betriebshof zusammen. Da der Betrieb sehr breit aufgestellt ist, verteilen sich die Fixkosten auf mehrere, auch größere Geschäftsfelder. Insgesamt ergaben sich für die Aufbereitung der Holzhackschnittel Produktionskosten von 32,31 €/t_{atro} in Variante 2a. Das entspricht bei einem Wassergehalt des Endprodukts von 3,8 m-% Kosten von 31,08 €/t. Bei der Variante 2b waren es Produktionskosten von 32,07 €/t_{atro}, bzw. 27,88 €/t (bei M = 13,1 m-%).

Durch die Siebung entstehen, wie unter der Verfahrensbeschreibung bereits erläutert, mehrere vermarktungsfähige Produkte. Das Feinmaterial wird an Pferdehöfe als Einstreu verkauft. Ähnlich wie bei Fallstudie 1 lag der Anteil des Feinmaterials trotz unterschiedlicher Siebtechniken bei knapp 26 m-%.

7.2.3 Fallstudie 3: Entkoppelte Aufbereitung mittels Trommelsieb und Trocknung im Haufwerk

Verfahrensbeschreibung: Die dritte Fallstudie wurde bei einem land- und forstwirtschaftlichen Betrieb in der Oberpfalz/Bayern durchgeführt. Das Produktionsgelände besteht aus einer Lagerhalle mit rund 500 m² und einem Lagerplatz mit rund

900 m². Die Jahresproduktion aufbereiteter Holzhackschnittel aus Sägereestholz und Waldrestholz oder anderen Gehölzen liegt bei rund 9.000 Srm. Das Waldrestholz stammt aus Wäldern im Umkreis bis zu 100 km. Die Hauptabnehmer sind Privatkunden mit Kleinanlagen bis 100 kW (80%). Daher ist die sorgfältige Aufbereitung des Brennstoffs besonders wichtig. Es werden hauptsächlich zwei Holzhackschnittelsortimente angeboten: Eines besteht komplett aus Energierundholz, das andere ist eine Mischung aus Waldrestholz (30%), Sägereestholz (20%), Holz von Kurzumtriebsplantagen (10%) und Landschaftspflegeholz (40%). Es wird aber auch auf spezielle Kundenwünsche eingegangen.

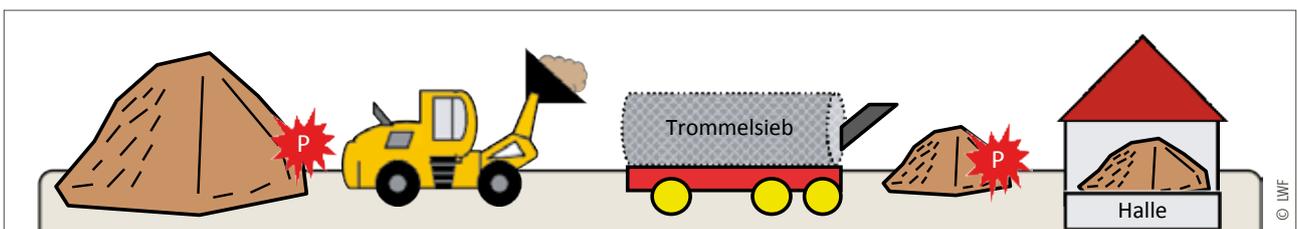
Die Aufbereitung besteht entweder aus zwei entkoppelten Schritten (Trocknen und Sieben) oder nur der Siebung (siehe Tabelle 7.9). Bei der vollständigen Aufbereitung werden die Holzhackschnittel nach dem Hacken zum Betriebshof transportiert und unter Vlies in einem Haufwerk mittels natürlicher Prozesse für 4–6 Monate getrocknet (Prozessschritt 1). Danach werden sie mit einem Trommelsieb (Terra Select, Modell T3) gesiebt (Prozessschritt 2). Ziel der Siebung ist es, den Feinanteil



Siebung mittels Trommelsieb in Fallstudie 3

Tabelle 7.9: Eingesetzte Maschinen/Prozesseinstellungen

Eingesetzte Maschinen/Prozesseinstellungen	
Prozessschritt 1: Trocknung	Trocknung im Haufwerk
Prozessschritt 2: Siebung	Trommelsieb Terra Select T3
Kopplungsgrad	alle Prozessschritte entkoppelt
Ausgangs- und Endprodukte	
Ausgangsmaterial	frische Waldrestholzhackschnittel
Hauptprodukt	getrocknete und gesiebte Holzhackschnittel
Nebenprodukt	Feinanteil (< 15 mm)



Prozessschritte und Probenahmepunkte („P“) der Fallstudie 3

zu separieren (Nebenprodukt). Hierfür wird das Material über den integrierten Bunker in das Trommelsieb befördert. Der Feinanteil fällt durch das Sieb auf ein Förderband und wird seitlich ausgeworfen. Die Holzhackschnitzel (Hauptprodukt) fallen am Ende der Trommel ebenfalls auf ein Förderband und werden mit einem Radlader in die Halle geschoben und dort bis zum Weitertransport an den Endverbraucher gelagert. Ist keine Trocknung vorgesehen, werden die Holzhackschnitzel entsprechend frisch gesiebt.

Vor Ort werden keine analytischen Qualitätsuntersuchungen gemacht. Die Abschätzung des Trocknungsfortschritts in den Haufwerken erfolgt vor allem aufgrund von Erfahrungen des Betriebsleiters.

Brennstoffqualität: In Fallstudie 3 wurde die Aufbereitung von zwei Ausgangsmaterialien begleitet (siehe Tabelle 7.10). Zum Einsatz kamen frisch gehackte Waldrestholzhackschnitzel aus Nadelholz mit einem Wassergehalt von 41,2 m-% und Holzhackschnitzel, die in einem Haufwerk vorgetrocknet wurden (38,1 m-%). Die relativ ähnlichen Wassergehalte deuten darauf hin, dass das frische Material schon eine gewisse Zeit ungehackt im Polter gelagert wurde und somit schon vortrocknen konnte. Im Gegensatz dazu zeigt die hohe Wassergehaltsstreuung im Material aus dem Haufwerk ($M_{\min-\max} = 27,1 \text{ m-%}$), dass

es bei der Lagerung zu einer starken Schichtbildung und somit zu einer Inhomogenisierung des Brennstoffes gekommen ist.

Die Siebung mittels Trommelsieb führte bei beiden Brennstoffen zu einer Durchmischung und somit zu deutlich homogenen Wassergehaltswerten. Gleichzeitig reduzierten sich der Aschegehalt und der Feinanteil sowie die verbrennungskritischen Inhaltsstoffe teils deutlich. Die Anteile an Überlängen waren in den nicht aufbereiteten Brennstoffen relativ gering, was auf eine sachgerechte und sorgfältige Bedienung des Hackers schließen lässt (siehe Kapitel 6). Somit konnten die Brennstoffe nach Absiebung des Feinanteils jeweils als P45s spezifiziert werden. Das erste Sortiment konnte aufgrund der hohen Wassergehalte vor und nach der Aufbereitung in die Klassifikation A2 nach DIN EN ISO 17225-4 (2021) eingeordnet werden. Eine Einordnung des zweiten Sortiments in dieselbe Klassifikation konnte erst nach der Aufbereitung durch die Siebung erfolgen.

Produktionskosten: Leider war es in dieser Fallstudie nicht möglich, Produktionskosten zu berechnen. Die Ergebnisse für eine Siebung mit einem anderen mobilen Trommelsieb werden in Fallstudie 6 (Kapitel 7.2.6) dargestellt.

Tabelle 7.10: Brennstoffqualität in Fallstudie 3 (wf = wasserfrei, ar = im Anlieferungszustand [engl. „as received“])

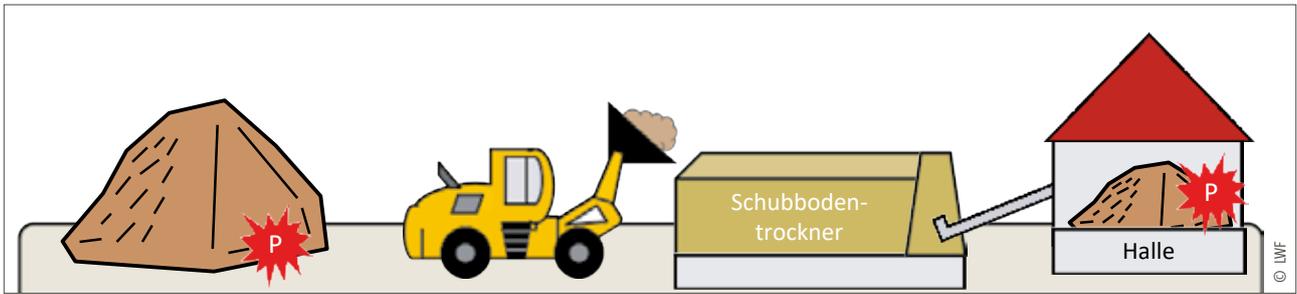
Parameter/ Eigenschafts- klasse	frisches Ausgangs- material	frisch gesiebt	HHS aus Lagerung	trocken gesiebt
Brennstoff-Nr.	3-A1	3-E1	3-A2	3-E2
M (m-%)	41,2	42,9	38,1	38,4
$M_{\max-\min}$ (m-%)	12,2	4,4	27,1	12,9
A (m-%, wf)	1,3	1,0	2,5	1,1
Q (MJ/kg, wf)	18,93	18,86	18,61	18,81
Q (MJ/kg, ar)	10,13	9,73	10,58	10,66
BD (kg/m ³ , ar)	283	270	285	257
F (m-%)	17,2	3,4	13,9	2,8
P-Klasse nach DIN EN ISO 17225-4 (2021)	P31 –	P16 P45s	P31 –	P31 P45s
N (m-%, wf)	0,24	0,20	0,34	0,25
S (m-%, wf)	0,01	0,01	0,02	0,01
Cl (mg/kg, wf)	56	58	56	56
K (mg/kg, wf)	1.330	1.020	1.550	1.340
Si (mg/kg, wf)	691	221	5.610	1.170
Σ (K, Na, Pb, Zn) (mg/kg, wf)	1.390	1.070	1.650	1.390
Klassifikation nach DIN EN ISO 17225-4 (2021)	A2	A2	–	A2



FrISChe Waldrestholzhackschnitzel vor (oben) und getrocknete und gesiebte Waldrestholzhackschnitzel nach (unten) der Aufbereitung aus Fallstudie 3. Ausgangsmaterial und Endprodukt entstammen nicht derselben Charge. Größe des Bildausschnittes ca. DIN A5

7.2.4 Fallstudie 4: Aufbereitung mittels Schubbodentrockner (Eigenbau)

Verfahrensbeschreibung: Die vierte Fallstudie wurde in einem landwirtschaftlichen Nebenerwerbsbetrieb in der Oberpfalz/Bayern durchgeführt. Die Produktionsstätte umfasst eine Halle mit rund 800 m² und einen Lagerplatz mit rund 500 m². Die



Prozessschritte und Probenahmepunkte („P“) der Fallstudie 4

Holzchackschnitzel werden durch Trocknung mit einem selbst konstruierten Schubbodentrockner aufbereitet (siehe Tabelle 7.11). Pro Jahr werden 450 Srm Holzchackschnitzel für den Verkauf auf einen Zielwassergehalt von 15 m-% getrocknet. Zusätzlich werden 800 Srm in Dienstleistung aufbereitet. Im Sommerhalbjahr werden mit der Anlage auch Futtermittel wie Gras und Mais getrocknet. In direkter Nachbarschaft befindet sich eine Biogasanlage, deren Abwärme für die Trocknung genutzt wird. Abnehmer für die getrockneten Holzchackschnitzel sind zu 80 % Privatkunden mit Anlagenleistungen < 100 kW und zu 20 % gewerbliche Abnehmer mit Anlagenleistungen von 100–300 kW. Neben Sägeresthackschnitzeln werden Holzchackschnitzel aus Waldholz getrocknet (20 % Nadelwaldrestholz, 80 % Energierundholz).

Die Holzchackschnitzel werden frisch gehackt aus einem Umkreis von bis zu 20 km erworben. Der Trockner wird mit der Abwärme der Biogasanlage betrieben. Der Bunker des Trockners wird mit dem Radlader befüllt und über einen Kratzboden werden die Holzchackschnitzel in den Trockner eingebracht. Der Vorratsbunker fasst rund 15 m³. Der Trockner hat eine Trocknungsfläche von 12 m². Die Schütthöhe der Holzchackschnitzel

Tabelle 7.11: Steckbrief zu Fallstudie 4

Eingesetzte Maschinen/Prozesseinstellungen	
Prozessschritt 1: Trocknung	Schubbodentrockner (Eigenbau)
Wärmequelle	Biogasanlage
Ausgangs- und Endprodukte	
Ausgangsmaterial	frische Waldrestholzchackschnitzel
Hauptprodukt	getrocknete Holzchackschnitzel
Nebenprodukt	Feinanteil (< 2 mm)

auf dem Trocknungsboden beträgt rund 30 cm. Das Hackschnitzelvolumen im Trockner beträgt somit rund 3,5 Srm. Sobald der Trocknungsboden befüllt ist, wird die Zufuhr manuell gestoppt und die Holzchackschnitzel werden je nach Wassergehalt mehrere Stunden getrocknet (Prozessschritt 1). Drei im Trockner angebrachte Sonden messen regelmäßig die Luftfeuchtigkeit. Ist der Zielwassergehalt erreicht, muss der Trocknungsvorgang manuell beendet werden. Der Schubboden beginnt sich zu bewegen und die trockenen Holzchackschnitzel werden ausgetra-



Schubbodentrockner (Eigenbau) (oben) und Befüllung des Trockners mittels Radlader (unten)



Waldrestholzchackschnitzel vor (oben) und nach (unten) der Aufbereitung aus Fallstudie 4. Größe des Bildausschnittes ca. DIN A5

gen. Dabei fällt ein sehr geringer Anteil an Feinmaterial durch die Luftlöcher auf den Boden des Trockners (Durchmesser der Luftlöcher: 2 mm), die Holzhackschnitzel fallen auf ein Förderband und werden in eine Halle transportiert. Dort lagern sie bis zum Verkauf an den Endkunden. Nach einigen Trocknungsvorgängen wird der Boden des Trockners ausgekehrt und der Feinanteil der Biogasanlage zugeführt. Somit wird bei diesem Aufbereitungsprozess nur ein vermarktungsfähiges Produkt hergestellt. Es werden keine zusätzlichen Qualitätsbestimmungen vor Ort durchgeführt, der Wassergehalt wird ausschließlich über die Sonden im Trockner bestimmt.

Brennstoffqualität: Das Ausgangsmaterial aus Fallstudie 4 hatte eine für Waldrestholz aus Nadelholz typische Brennstoffqualität (siehe Tabelle 7.12) [7-4]. Lediglich der Wassergehalt von 42 m-% und dessen starke Schwankung deuten darauf hin, dass das Material teilweise schon angetrocknet war.

Durch die Trocknung im Schubbodentrockner wurde der Wassergehalt auf 7,1 m-% reduziert. Auch wurde die Schwankungsbreite des Wassergehalts deutlich verringert. Interessanterweise kam es bei der Trocknung auch zu einer geringen Änderung im Aschegehalt, im Feinanteil und in den verbrennungskritischen Inhaltsstoffen. Bei der hier dargestellten Trocknung werden die Holzhackschnitzel über ein Lochblech geschoben (Lochdurchmesser 2 mm). Hierbei werden zu einem geringen Anteil Nadeln und andere feine Partikel ausgesiebt. Nach der Trocknung konnte die Klassifikation A1 eingehalten werden.

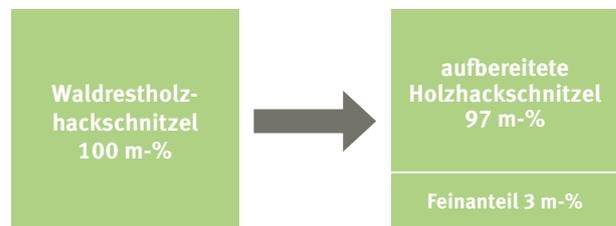
Tabelle 7.12: Brennstoffqualität in Fallstudie 4 (wf = wasserfrei, ar = im Anlieferungszustand [engl. „as received“])

Parameter/ Eigenschaftsklasse	frisches Ausgangsmaterial	getrocknet
Brennstoff-Nr.	4-A	4-E
M (m-%)	42,0	7,1
M _{max-min} (m-%)	9,7	2,7
A (m-%, wf)	1,7	1,4
Q (MJ/kg, wf)	18,84	18,72
Q (MJ/kg, ar)	9,90	17,23
BD (kg/m ³ , ar)	290	202
F (m-%)	19,3	18,3
P-Klasse nach DIN EN ISO 17225-4 (2021)	P31	P16
N (m-%, wf)	0,34	0,30
S (m-%, wf)	0,01	0,01
Cl (mg/kg, wf)	66	56
K (mg/kg, wf)	1.430	1.170
Si (mg/kg, wf)	1.630	1.020
∑ (K, Na, Pb, Zn) (mg/kg, wf)	1.510	1.240
Klassifikation nach DIN EN ISO 17225-4 (2021)	–	A1

Tabelle 7.13: Produktionskosten in Fallstudie 4

Prozessschritte	€/t _{atro}
1 Trocknung (Schubboden)	109,48
sonstige Kosten	25,02
Produktionskosten	134,51
bezogen auf Endprodukt	125,02 €/t (M = 7,1 m-%)

Produktionskosten: Am Tag der Fallstudie wurde ein Trocknungsgang begleitet und dabei eine Durchsatzrate von 0,14 t_{atro}/h ermittelt. Dieser Durchsatz war im Vergleich zu den anderen Fallstudien relativ niedrig. Dementsprechend fielen auch die Kosten des Trockenvorgangs mit 109,48 €/t_{atro} vergleichsweise hoch aus. Die sonstigen Kosten setzen sich aus Kosten für Maschinen und den Betriebshof zusammen und lagen bei 25,02 €/t_{atro} (siehe Tabelle 7.13). Insgesamt lagen die Produktionskosten somit bei 134,51 €/t_{atro}. Bezogen auf einen Wassergehalt von 7,1 m-%. Entspricht dies 125,02 €/t. Da der Zielwassergehalt von 15 m-% deutlich unterschritten wurde, wäre eine kürzere Laufzeit je Trocknungsvorgang und damit eine höhere Durchsatzrate denkbar, was auch die Kosten deutlich reduzieren würde. Da die Holzhackschnitzel nur getrocknet und nicht gesiebt werden, entstehen keine Nebenprodukte in relevanter Menge. Der durch die Luftlöcher des Kratzbodens gefallene Feinanteil machte einen Anteil von 3,3 m-% des Gesamtmaterials aus und wird in den Gärprozess der betriebseigenen Biogasanlage geführt.

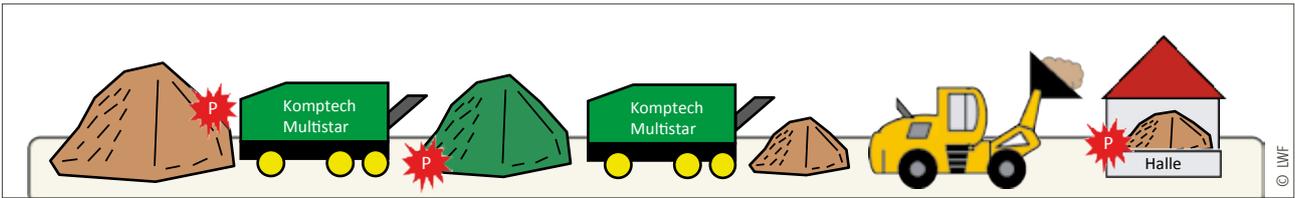


Verteilung der Haupt- und Nebenprodukte während der Aufbereitung in Fallstudie 4 (bezogen auf die Trockenmasse)

7.2.5 Fallstudie 5: Entkoppelte Aufbereitung mittels Sternsieb und Trocknung im Haufwerk

Verfahrensbeschreibung: Die fünfte Fallstudie wurde an einem Biomassehof in Detmold/Nordrhein-Westfalen durchgeführt. Auf einer rund 3,3 ha großen Fläche mit mehreren Lagerhallen werden Waldrestholzhackschnitzel aus Laubholz und verschiedene Pellets aus Holz und Stroh hergestellt und Altholz aufbereitet. Neben Kompost und Rindenmulch findet man auch Strohpellets als Tierstreu im Sortiment. Rund 40% der Abnehmer der Brennstoffe sind Privatkunden, weitere 20% Kommunen. Die restlichen 40% sind gewerbliche Kunden. Die Leistung der Anlagen der Kunden liegt zu 50% bei < 100 kW, zu 20% zwischen 100–300 kW und zu 30% > 1.000 kW.

Es werden zwei Sortimente für Anlagen < 100 kW aufbereitet. Das eine Sortiment besteht zu 100% aus Laubsägerestholz, welches gesiebt und getrocknet wird. Insgesamt mehr als die Hälfte der Kunden fragen dieses Sortiment nach. Das Ausgangs-



Prozessschritte und Probenahmepunkte („P“) der Fallstudie 5

Tabelle 7.14: Steckbrief zu Fallstudie 5

Eingesetzte Maschinen/Prozesseinstellungen	
Prozessschritt 1: Trocknung	Trocknung im Haufwerk (offen max. 2–3 Wochen)
Prozessschritt 2: Siebung 1	Sternsieb Komptech Multistar
Prozessschritt 3: Trocknung	Trocknung im Haufwerk
Prozessschritt 4: Siebung 2	Sternsieb Komptech Multistar
Prozessschritt 5: Trocknung	Nachtrocknung in Lagerhalle
Kopplungsgrad	alle Prozessschritte entkoppelt
Ausgangs- und Endprodukte	
Ausgangsmaterial	frische Waldrestholz hackschnitzel
Hauptprodukt	getrocknete und gesiebte Holz hackschnitzel
Nebenprodukt 1	Überlängen (> 45 mm)
Nebenprodukt 2	Feinanteil (< 20 mm)

material für das zweite Sortiment besteht zum größten Teil aus Waldrestholz, aus Laubholz sowie Landschaftspflegeholz und Straßenbegleitholz. Die Aufbereitung dieses Sortiments wurde in der Fallstudie begleitet.

Der Aufbereitungsprozess besteht aus mehreren entkoppelten Schritten (siehe Tabelle 7.14). Das Ausgangsmaterial wird gehackt aus einem Umkreis von 20–50 km zum Biomassehof geliefert. Vor Ort wird das Eingangsgewicht bestimmt und ein Haufwerk aufgeschüttet. Dieses bleibt ca. zwei Wochen offen liegen (sog. „Antrocknen“, Prozessschritt 1). Nach dieser Zeit werden mit einem Sternsieb (Komptech, Modell Multistar M) Feinanteil und Überlängen ausgesiebt (Prozessschritt 2). Diese werden in Anhängern aufgefangen. Während der gesamten Siebung sorgt ein Radladerfahrer dafür, dass das Sieb kontinuierlich befüllt wird. Nach der Siebung werden die Holz hackschnitzel wiederum mit dem Radlader in ein Haufwerk aufgeschoben, mit einem Vlies abgedeckt und für 4–6 Monate gelagert (Prozessschritt 3). Während dieser Zeit kommt es zu einer natürlichen Trocknung. Diese wird mithilfe von kapazitiv messenden Einstechlanzen immer wieder überprüft. Wenn der Wassergehalt im Haufwerksinneren bei rund 30 m-% liegt, werden die Holz hackschnitzel entweder an Kunden mit mittelgroßen Anlagen verkauft oder für die Nutzung in Anlagen mit < 100 kW ein zweites Mal mit dem Sternsieb gesiebt (Prozessschritt 4). Während das Haufwerk dafür aufgedeckt wird, werden die Vliese von zwei Personen zusammengelegt und mit dem Radlader in eine Lager- und Werkzeughalle transportiert. Dort werden die Vliese zum Trocknen unter dem Dach aufgespannt. Sie werden



Halb aufgedecktes Haufwerk mit Schichtbildung (oben) und Sternsieb (unten)

mehrere Jahre zum Abdecken wiederverwendet. Auch beim zweiten Siebvorgang werden Feinanteil (Nebenprodukt 2) und Überlängen (Nebenprodukt 1) ausgesiebt. Der Feinanteil wird als Einstreu an Pferdehöfe verkauft und die Überlängen an große Heizkraftwerke zur Verbrennung abgegeben.

Nach der zweiten Siebung werden die Holz hackschnitzel (Hauptprodukt) mit dem Radlader in eine Lagerhalle verbracht und verbleiben dort, bis das Material an den Endkunden verkauft wird. Damit erhält man bei dieser Art der Aufbereitung drei vermarktungsfähige Sortimente.

Um die Transportwege auf dem Biomassehof so kurz wie möglich zu halten, wird das mobile Sieb passend in der Nähe des aktuell zu bearbeitenden Haufwerks aufgebaut. Insgesamt sind an dem Aufbereitungsprozess zwischen ein und drei Personen beteiligt, wobei eine Person permanent den Radlader bedient. In regelmäßigen Abständen werden direkt am Betriebs-hof Proben der aufbereiteten Holz hackschnitzel gewonnen und Qualitätsparameter bestimmt. Neben dem Wassergehalt kann auch die Partikelgrößenverteilung bestimmt werden. Hierfür stehen ein Darrofen und eine Siebmaschine zur Verfügung. Weitere Parameter wie Aschegehalt und Heizwert werden zum

Teil von externen Laboren, zum Teil in Kooperation mit regional ansässigen Hochschulen in regelmäßigen Abständen bestimmt.

Brennstoffqualität: In Fallstudie 5 wurde Waldrestholz aus Laubholz in abwechselnden Schritten gesiebt und gelagert. Die Lagerdauer beträgt bis zu 5 Monate. Für die Fallstudie konnte somit keine Einzelcharge über die gesamte Prozesskette begleitet werden, wodurch eine direkte Vergleichbarkeit der Brennstoffe schwierig ist.

Das nur kurz angetrocknete Ausgangsmaterial (5-A1) zeigt für Waldrestholz typische Werte (siehe Tabelle 7.15) [7-4]. Der Feinanteil war im Vergleich zu den anderen Fallstudien, bei denen Waldrestholzhackschnitzel aus Nadelholz verwendet wurden, nur etwa halb so groß. Dies kann wahrscheinlich auf den fehlenden Nadelanteil zurückgeführt werden. Eine Klassifizierung nach DIN EN ISO 17225-4 (2021) ist aber auch in diesem Fall nicht möglich (hoher Aschegehalt, hoher Anteil an Überlängen). Durch die Siebung mittels Sternsieb reduzieren sich sowohl bei frischen, d.h. maximal zwei Wochen angetrockneten (5-A1), als auch bei vorgelagerten Holzhackschnitzeln (5-A2) der Aschegehalt, der Feinanteil und die verbrennungskritischen Inhaltsstoffe

Tabelle 7.15: Brennstoffqualität in Prozesskette 5 (wf = wasserfrei, ar = im Anlieferungszustand [engl. „as received“])

Parameter/ Eigenschafts- klasse	frisches Ausgangs- material	frisch gesiebt	1 x Siebung 1 x Lager- rung	2 x Siebung 1 x Lager- miete	2 x Siebung 2 x Lager- rung
Brennstoff-Nr.	5-A1	5-E1	5-A2	5-E2	5-E3
M (m-%)	42,5	39,1	41,7	32,4	25,3
M _{max-min} (m-%)	17,3	1,5	18,8	4,1	6,8
A (m-%, wf)	3,7	3,0	2,6	1,7	2,5
Q (MJ/kg, wf)	17,66	17,77	18,25	18,17	17,88
Q (MJ/kg, ar)	9,12	9,87	9,62	11,50	12,75
BD (kg/m ³ , ar)	298	294	297	261	220
F (m-%)	9,6	4,3	5,8	2,0	2,9
P-Klasse nach DIN EN ISO 17225-4 (2021)	P31 -	P31 -	P45 -	P31 P45s	P31 P45s
N (m-%, wf)	0,34	0,33	0,32	0,23	0,38
S (m-%, wf)	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01
Cl (mg/kg, wf)	63	57	67	56	72
K (mg/kg, wf)	2.380	2.090	1.980	1.860	2.490
Si (mg/kg, wf)	4.560	2.260	3.620	2.080	2.560
Σ (K, Na, Pb, Zn) (mg/kg, wf)	2.560	2.210	2.110	1.950	2.660
Klassifikation nach DIN EN ISO 17225-4 (2021)	-	-	-	B1	B1



FrISChe Waldrestholzhackschnitzel (Laubholz) vor (oben) und nach (unten) der Aufbereitung aus Fallstudie 5. Ausgangsmaterial und Endprodukt entstammen nicht derselben Charge. Größe des Bildausschnittes ca. DIN A5

(5-E1, 5-E2). Der Effekt war deutlicher bei dem länger vorge-trockneten Material (5-E2) als bei nur angetrockneten, noch relativ frischen Holzhackschnitzeln (5-E1). Durch die zweite Siebung wurde zudem die Spezifikation P45s erreicht.

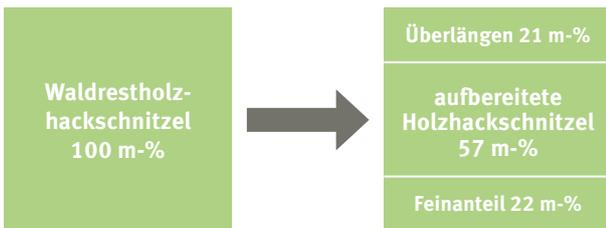
Der Wassergehalt wurde durch die Trocknung reduziert, wobei das Material nach dem längeren Trocknungsschritt von 4–6 Monaten (5-A2) noch Werte analog des hier verwendeten „frischen“ Materials (5-A1) aufwies. Grund hierfür kann ein hoher Wassergehalt in der äußeren Haufwerksschicht sein, wohingegen das Material im Haufwerksinneren bereits relativ trocken gewesen sein könnte (siehe Kapitel 6). Die große Schwankungsbreite der Wassergehalte in den ungesieberten Materialien deutet ebenso auf eine heterogene Trocknung innerhalb der Haufwerke hin. Da die Holzhackschnitzel aber aus unterschiedlichen Chargen kommen, ist kein direkter Vergleich möglich. Somit ist der Ausgangswassergehalt der hier untersuchten über 4–6 Monate getrockneten Holzhackschnitzel nicht bekannt, was die Bewertung des Trocknungserfolges erschwert.

Durch die Siebung reduziert sich sowohl der Wassergehalt als auch dessen Schwankungsbreite (5-E1, 5-E2). Dies deutet darauf hin, dass das aufgrund von Schichtbildung in dem Haufwerk sehr heterogene Ausgangsmaterial durch den Siebprozess homogenisiert wurde. Die beobachtete Reduzierung des absoluten Wassergehalts könnte theoretisch durch unterschiedliche Wassergehalte in den ausgesieberten Fraktionen erklärt werden,

jedoch liegen diese mit 33,5 m-% (Feinanteil) und 31,3 m-% (Überlängen) nahe am Wassergehalt der Holzhackschnitzel nach der zweiten Siebung (32,4 m-%). Besonders die zweite Lagerphase reduzierte noch einmal den Wassergehalt, verstärkt möglicherweise durch die regengeschützte Lagerung in der Halle und eine möglicherweise gute Belüftung der Haufen durch das höhere Porenvolumen. Insgesamt konnten die Holzhackschnitzel nach der Aufbereitung in die Klassifikation B1 nach DIN EN ISO 17225-4 (2021) eingeordnet werden.

Tabelle 7.16: Produktionskosten in Fallstudie 5

Prozessschritte	€/t _{atro}
2 Siebung 1 (Trommelsieb)	3,47
3 Trocknung (Haufwerk unter Vlies)	2,49
4 Siebung 2 (Trommelsieb)	5,73
sonstige Kosten (inkl. Prozessschr. 1 u. 5)	34,19
Produktionskosten	45,88
bezogen auf Endprodukt	31,03 €/t (M = 32,4 m-%)



Durchschnittliche Verteilung der beiden Siebungen aus Fallstudie 5 (bezogen auf die Trockenmasse)

Produktionskosten: Bei Fallstudie 5 wurden die Siebungen im frischen und im getrockneten Zustand als zwei einzelne Prozessschritte betrachtet.

Die erste Siebung (Prozessschritt 2) mit frischem Ausgangsmaterial hatte eine Durchsatzrate von 13,82 t_{atro}/h. Die Kosten beliefen sich auf 3,47 €/t_{atro} (siehe Tabelle 7.16). Bei der zweiten Siebung (Prozessschritt 4) wurden Holzhackschnitzel gesiebt, die bereits mehrere Monate unter Vlies getrocknet (Prozessschritt 3)

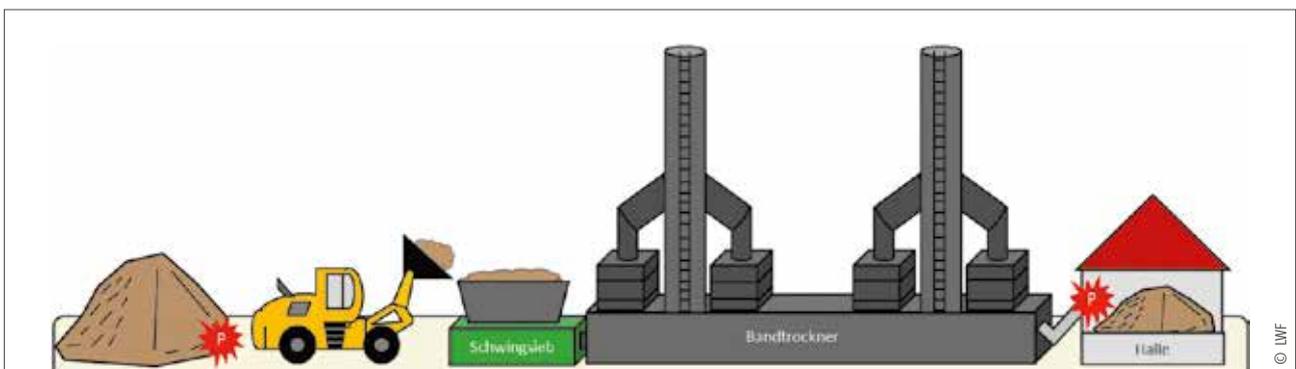
waren. Für diese Siebung ergab sich ein geringerer Durchsatz von 8,38 t_{atro}/h. Dadurch waren die Kosten der zweiten Siebung höher und lagen bei 5,73 €/t_{atro}. Der Grund für den großen Unterschied bei den Durchsatzraten konnte nicht abschließend geklärt werden.

Die Kosten für die mehrmonatige Lagerung und Trocknung der Holzhackschnitzel (Prozessschritt 3) betragen 2,49 €/t_{atro}. In die sonstigen Kosten flossen neben den Kosten für Maschinen und den Betriebshof auch die Lagerungskosten für Prozessschritt 1 und 5 mit ein. Daraus ergaben sich sonstige Kosten von 34,19 €/t_{atro}. Insgesamt lagen die Produktionskosten in dieser Fallstudie bei 45,88 €/t_{atro}. Bezogen auf das Endprodukt mit einem Wassergehalt von 32,4 m-% entspricht dies 31,03 €/t. Die aufbereiteten Holzhackschnitzel hatten nach beiden Siebungen und der Lagerung einen Anteil von etwas mehr als 57 m-% des Ausgangsmaterials. Somit lag der Anteil der Nebenprodukte bei ca. 43 m-%, wovon jeweils rund die Hälfte auf Überlängen und Feinanteil entfielen. Der Absatz der Nebenprodukte spielt daher eine besonders gewichtige Rolle.

7.2.6 Fallstudie 6: Aufbereitung mittels Bandtrockner und Schwingsieb (gekoppelt) und mittels Trommelsieb (entkoppelt)

Verfahrensbeschreibung: Fallstudie 6 wurde an einem großen Betrieb in Schwaben/Bayern durchgeführt. Die Firma verfügt über einen Bandtrockner und trocknet vorrangig Futtermittel. Die Wärme dafür kommt aus dem betriebseigenen Biomasseheizkraftwerk. Dieses wird mit Holz aus der Region betrieben. Zusätzlich zur Stromeinspeisung werden Industriekunden über eine Fernwärmeleitung ganzjährig, vor allem aber im Winter mit Prozesswärme versorgt. Um die Anlage das ganze Jahr auslasten zu können, wird die Wärme vor allem im Sommer zur Trocknung von verschiedenen Stoffen genutzt. Neben der Trocknung von Futtermitteln werden Holzhackschnitzel, allen voran Sägereholz-hackschnitzel getrocknet. Daneben werden sowohl Holzpellets als auch Briketts produziert. Zudem produziert die Firma Holzhackschnitzel als Abdeckmaterial und Fallschutz für Spielplätze. Für die Aufbereitung der Holzhackschnitzel stehen mehrere Lagerhallen (> 3.600 m²) und ein großer Lagerplatz mit ca. 6.000 m² zur Verfügung.

Der Aufbereitungsprozess in Variante 6a besteht aus zwei aneinandergeschlossenen Schritten (siehe Tabelle 7.17). Die Holzhackschnitzel werden gehackt am Betriebshof angeliefert und gewogen. Danach werden sie mit einem Radlader in einen Bunker gefüllt. Von dort werden die Holzhackschnitzel zuerst mit



Prozessschritte und Probenahmepunkte („P“) der Fallstudie 6a

einen Schwingsieb (Zeno, Modell P 90, Prozessschritt 1) in drei Fraktionen gesiebt. Die Überlängen (Nebenprodukt 1) und der Feinanteil (Nebenprodukt 2) werden gesammelt, wobei die Überlängen im betriebseigenen Heizkraftwerk verfeuert werden und der Feinanteil für die Produktion von Briketts verwendet wird. Die Holzhackschnitzel (Hauptprodukt) werden über ein Förderband weiter in den Bandtrockner (Stela, Prozessschritt 2) befördert. Dort liegen die Holzhackschnitzel auf einem luftdurchlässigen Band, welches von unten mit Luft durchströmt wird. Je nach aktuellem Wassergehalt der Holzhackschnitzel, bestimmt durch ein Infrarot-Messgerät (Mesa, Modell MM 710) im Inneren des Trockners, bewegt sich das Band schneller oder langsamer und bestimmt so die Trocknungszeit. Haben die Holzhackschnitzel den Zielwassergehalt von ca. 15 m-% erreicht, werden sie aus dem Trockner über ein Förderband in ein Zwischenlager gefördert und fallen dort entweder direkt in Container oder Schubboden-Lkw oder werden mit dem Radlader in eine Lagerhalle transportiert. Je nach Nachfrage werden sie dort bis zur Auslieferung an die Kunden gelagert. Verschiedene Qualitätsparameter können direkt vor Ort bestimmt werden. Das Unternehmen verfügt außerdem über ein Trommelsieb (Doppstadt, Modell 620), welches aber nur selten für die Aufbereitung von Waldrestholzhackschnitzeln verwendet wird. Hierdurch bot sich in Fallstudie 6 die Möglichkeit eines direkten Vergleichs der Qualitätsveränderung des Ausgangsmaterials bei Siebung mit zwei unterschiedlichen Siebanlagen. Die Siebung mittels Trommelsieb ohne Trocknung wurde als Variante 6b untersucht.

Brennstoffqualität: Als Ausgangsmaterial für Fallstudie 6 wurde typisches Waldrestholz aus Nadelholz verwendet (siehe Tabelle 7.18). Wassergehalt und Feinanteil lagen im zu erwartenden Bereich [7-4]. Der Aschegehalt war leicht erhöht und lässt neben hohen Anteilen an Nadeln und Rinde einen Eintrag von Mineralboden vermuten [7-2]. Eine Klassifizierung des Ausgangsmaterials nach DIN EN ISO 17225-4 (2021) war nicht möglich (hoher Aschegehalt, unpassende Partikelgröße).

Die Siebung mit dem Schwingsieb reduzierte sowohl den Aschegehalt, den Feinanteil und den Anteil an Überlängen als

Tabelle 7.18: Brennstoffqualität in Fallstudie 6 (wf = wasserfrei, ar = im Anlieferungszustand [engl. „as received“])

Parameter/ Eigenschafts- klasse	frisches Ausgangs- material	frisch gesiebt (Schwingsieb)	gesiebt getrocknet	frisch gesiebt (Trommelsieb)	trocken gesiebt (Trommelsieb)
Brennstoff-Nr.	6-A	6-S	6-E1	6-E2	6-E3
M (m-%)	48,1	48,4	15,2	45,0	8,5
M _{max-min} (m-%)	15,3	13,4	6,7	6,9	8,9
A (m-%, wf)	5,3	1,6	1,7	1,5	1,5
Q (MJ/kg, wf)	18,49	18,96	19,11	18,87	18,84
Q (MJ/kg, ar)	8,43	8,61	15,84	9,29	17,03
BD (kg/m ³ , ar)	334	–	189	292	166
F (m-%)	18,3	1,55	1,0	0,9	0,49
P-Klasse nach DIN EN ISO 17225-4 (2021)	P45 –	P31 P45s	P31 P45s	P45 –	P31 P45s
N (m-%, wf)	0,36	0,15	0,19	0,21	–
S (m-%, wf)	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
Cl (mg/kg, wf)	84	62	87	74	83
K (mg/kg, wf)	2.040	1.300	1.490	1.330	–
Si (mg/kg, wf)	7.380	1.880	1.410	1.020	–
∑ (K, Na, Pb, Zn) (mg/kg, wf)	2.190	1.380	1.570	1.400	–
Klassifikation nach DIN EN ISO 17225-4 (2021)	–	B1	–	A2	A1

auch die Konzentrationen an verbrennungskritischen Inhaltsstoffen teils deutlich. Durch die Trocknung mittels Bandtrockner (gekoppelt an das Schwingsieb) reduzierte sich der Wassergehalt auf 15,2 m-%. Auch die Schwankungsbreite im Wassergehalt reduzierte sich deutlich. Die gesiebten und getrockneten Holzhackschnitzel konnten als Klassifikation B1 nach DIN EN ISO 17225-4 (2021) eingeordnet werden. Limitierend war in diesem Fall der Aschegehalt von 1,7 m-%. Eine erneute Siebung im trockenen Zustand oder die Verwendung eines Ausgangsmaterials mit niedrigerem Aschegehalt (z. B. Energierundholz) könnte hier eine Verbesserung bewirken.

Die optionale Siebung frischer Holzhackschnitzel mit dem mobilen Trommelsieb (Variante 6b) zeigte eine ähnlich gute Siebung im Vergleich zum Schwingsieb, da auch mit diesem der Feinanteil und der Aschegehalt reduziert wurden. Allerdings werden mit dem hier verwendeten Trommelsieb Überlängen nicht abgeschieden, weshalb die Holzhackschnitzel nicht in eine „Ps-Klasse“ (P16s, P31s, P45s) nach DIN EN ISO 17225-4 (2021) eingeordnet werden konnten. Eine zusätzliche Abscheidung von Überlängen erfordert den Wechsel des Siebes oder die Verwendung von Trommelsieben, die mehr als eine Fraktion abscheiden können. Die Holzhackschnitzel konnten in die Klassifikation „A2“ eingeordnet werden.

Tabelle 7.17: Steckbrief zu Fallstudie 6a

Eingesetzte Maschinen/Prozesseinstellungen	
Prozessschritt 1: Siebung	Schwingsieb Zeno P90
Prozessschritt 2: Trocknung 1	Bandtrockner Stela
Wärmequelle	Biomasseheizkraftwerk
Kopplungsgrad	alle Prozessschritte miteinander gekoppelt
Ausgangs- und Endprodukte	
Ausgangsmaterial	frische Waldrestholzhackschnitzel/ frische Sägereistholzhackschnitzel
Hauptprodukt	getrocknete und gesiebte Holzhackschnitzel
Nebenprodukt 1	Überlängen (> 45 mm)
Nebenprodukt 2	Feinanteil (< 15 mm)

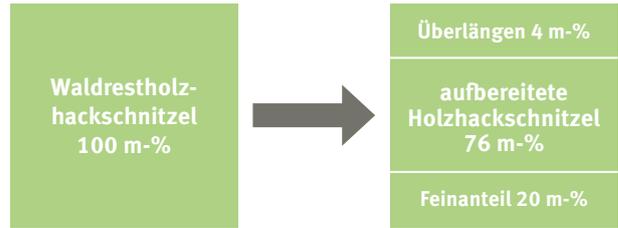


Frische Waldrestholzhackschnitzel vor (oben) und nach (unten) der Aufbereitung aus Fallstudie 6a mittels Schwingsieb und Bandrockner. Größe des Bildausschnittes ca. DIN A5

Eine erneute Siebung der bereits mittels Schwingsieb und Bandrockner aufbereiteten Holzhackschnitzel als zusätzliche Variante zeigte nur einen geringen Effekt, da die Holzhackschnitzel bereits sehr hochwertig waren. Die weitere Reduzierung des Feinanteils und des Aschegehalts ermöglichte jedoch die Klassifikation A1 nach DIN EN ISO 17225-4 (2021). Ebenso könnte die Reihenfolge der Prozessschritte geändert werden, sodass zunächst mittels Bandrockner getrocknet und erst anschließend mittels Schwingsieb gesiebt wird. Zu beachten ist dabei jedoch, dass auf diese Weise eine deutlich größere Masse an Brennstoff erst getrocknet werden muss, was zu einer höheren Laufzeit und zu einer geringeren Durchsatzleistung des Bandrockners (bezogen auf das Hauptprodukt) führen würde.

Tabelle 7.19: Produktionskosten in Fallstudie 6a

Prozessschritte	€/t _{atro}
1 Siebung (Schwingsieb)	3,00
2 Trocknung (Bandrockner)	34,06
sonstige Kosten	15,22
Produktionskosten	52,28
bezogen auf Endprodukt	44,36 €/t (M = 15,2 m-%)



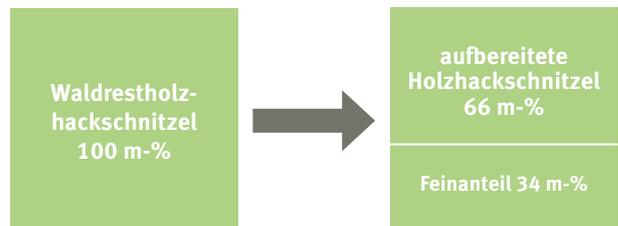
Verteilung der Haupt- und Nebenprodukte aus Fallstudie 6a (bezogen auf die Trockenmasse)

Tabelle 7.20: Produktionskosten in Fallstudie 6b

Prozessschritte	€/t _{atro}
1 Siebung (Trommelsieb)	3,63
sonstige Kosten	15,22
Produktionskosten	18,57
bezogen auf Endprodukt	10,22 €/t (M = 45,0 m-%)

Produktionskosten: Bei der Aufbereitung in Variante 6a handelt es sich um einen gekoppelten Prozess. Die ermittelte Durchsatzrate von 3,75 t_{atro}/h gilt daher sowohl für das Sieb als auch für den Trockner. Der Bandrockner hatte die höchsten Investitionskosten aller beteiligten Maschinen. Der Trocknungsvorgang verursachte Kosten von 34,06 €/t_{atro} (siehe Tabelle 7.19). Das Aussieben der Überlängen und des Feinanteils mittels Schwingsieb belief sich auf 3,00 €/t_{atro}. Die sonstigen Kosten für Maschinen und den Betriebshof lagen bei 15,22 €/t_{atro}. Es fielen insgesamt Produktionskosten in Höhe von 52,28 €/t_{atro} an. Bezogen auf den Wassergehalt des Endprodukts, der bei 15,2 m-% lag, entspricht dies Produktionskosten von 44,36 €/t.

Der Betreuungsaufwand der Anlage kann als relativ gering bezeichnet werden. Die hohe Auslastung der Anlage über das Jahr hinweg und die Aufteilung der Fixkosten auf mehrere Geschäftsbereiche wirken sich positiv auf die Produktionskosten aus.



Verteilung der Haupt- und Nebenprodukte aus Fallstudie 6b (bezogen auf die Trockenmasse)

Der Anteil des Feinmaterials lag bei rund 20 m-%. Dieses Nebenprodukt wird von der Firma brikettiert und ebenfalls als Brennstoff vermarktet. Die Briketts wurden nicht im Rahmen des Projekts „qualiS“ untersucht, lassen aber einen erhöhten Aschegehalt erwarten.

Die zusätzlich untersuchte Variante 6b mit Siebung im frischen Zustand mit einem Trommelsieb ergab einen Durchsatz von 7,15 t_{atro}/h. Die kalkulierten Kosten beliefen sich auf



Holzhackschnitzel auf dem Biomassehof von Fallstudie 1

3,63 €/t_{atro}. Die sonstigen, betriebsbezogenen Kosten wurden analog zur vorangehenden Variante mit 15,22 €/t_{atro} angesetzt. Somit ergaben sich Produktionskosten von 18,57 €/t_{atro}, was, bezogen auf den Wassergehalt des Endprodukts von 45,0 m-%, insgesamt 10,22 €/t entspricht. Durch die Siebung entstand ein Anteil von 66% Holzhackschnitzel und 34% Feinanteil. Auch hier konnte der Anteil des ausgesiebten Feinanteils für die Brikettierung genutzt werden. Allerdings muss beachtet werden, dass das Hauptprodukt ohne Trocknung nach wie vor einen hohen Wassergehalt aufwies und zur Verwendung in kleinen Anlagen eine zusätzliche Trocknung notwendig wäre.

7.2.7 Zusammenfassung Brennstoffqualität

Die Wassergehalte aller Ausgangsmaterialien lagen bei 41,2 bis 51,0 m-% und befanden sich damit im typischen Bereich für waldfrische Holzhackschnitzel [7-4]. Auch der Aschegehalt lag im Erwartungsbereich für Waldrestholz, wobei die Werte in Fallstudie 2 (A = 7,4 m-%, wf) und Fallstudie 5 (A = 5,3 m-%, wf) neben hohen Anteilen an Nadeln und Rinde zusätzlich auf einen Eintrag mit Mineralboden schließen lassen [7-2]. Denselben Schluss lässt der hohe Siliziumanteil des Ausgangsmaterials von Fallstudie 2 mit > 10.000 mg/kg zu. Aufgrund des hohen Feinanteils und der maximalen Partikellänge konnte keines der Ausgangsmaterialien den „Ps-Klassen“ (P16s, P31s, P45s) der DIN EN ISO 17225-4 (2021) zugeordnet werden. Allerdings ließen sich die unbehandelten Holzhackschnitzel als P31 bzw. P45 einordnen. Auch eine Zuordnung zu den Klassifikationen A1 bis B2 war für die Ausgangsmaterialien mit Ausnahme von Fallstudie 3 nicht möglich. Sowohl der Heizwert als auch die inhaltsstoffliche Zusammensetzung, z. B. die Summe der aerosolbildenden Elemente, waren dabei typisch für Waldrestholz [7-2].

Alle verwendeten technischen Trocknungsarten (Fallstudie 1, 2, 4 und 6) reduzieren den Wassergehalt der frischen Holzhackschnitzel zuverlässig auf Werte von < 15 m-%. Je nach Verweildauer im Trockner kann der Brennstoff dabei auch Werte unterhalb des lufttrockenen Zustandes annehmen, z. B. 3,8 und 7,1 m-% in Fallstudie 2 bzw. 4, welche sich mitunter negativ auf das Verbrennungsverhalten der Brennstoffe und die Wirtschaftlichkeit der Trocknungsanlage auswirken. Daneben kann der Wassergehalt durch die Trocknung, aber auch durch die Mischung des Materials bei der Siebung der Brennstoffe homogener werden. Hierdurch reduzieren sich die Schwankungen im Wassergehalt im Vergleich zu

den teils sehr heterogenen Ausgangsmaterialien deutlich.

Die Trocknung der Brennstoffe mittels natürlicher Prozesse in Haufwerken führte dagegen in beiden beobachteten Fällen zu geringeren Trocknungseffekten (Fallstudie 3 und 5), wobei sich durch Schichtbildung in den Haufwerken auch die Heterogenität im Wassergehalt erhöhte. Dennoch konnten Wassergehalte < 35 m-% erreicht werden. Hierbei ist v. a. eine gute Homogenisierung des Materials zu empfehlen. Eine Garantie, auf welchen Wassergehalt sich natürlich trocknen lässt, ergibt sich aus den Fallstudien nicht. Eine Kontrolle des Wassergehalts bei Auslieferung ist somit zu empfehlen. Weiterhin gelten die allgemeinen Empfehlungen zur Trocknung in Haufwerken aus Kapitel 6.

Die Siebung hatte vornehmlich einen positiven Effekt auf den Aschegehalt, die Partikelgrößenverteilung und die Konzentration an verbrennungskritischen Inhaltsstoffen. Der Aschegehalt lag dabei bei gesiebten Holzhackschnitzeln um 20% (Fallstudie 5) bis zu 75% (Fallstudie 2) niedriger als beim Ausgangsmaterial und konnte in allen Fällen die Eigenschaftsklasse A3.0 (≤ 3,0 m-%) bzw. in einigen Fällen sogar die Eigenschaftsklasse A1.5 (≤ 1,5 m-%) nach DIN EN ISO 17225-4 (2021) einhalten. Ebenfalls waren die verbrennungskritischen Inhaltsstoffe teils deutlich reduziert. Während für die Ausgangsmaterialien eine Spezifikation als „Ps-Klasse“ nach DIN EN ISO 17225-4 (2021), d. h. in die Partikelklassen P16s, P31s und P45s, aufgrund eines hohen Feinanteils und aufgrund von Überlängen nicht möglich war, konnten nach der Siebung die meisten Produkte den Spezifikationen P31s oder P45s zugeordnet werden. Dabei wurde in allen Fällen der Feinanteil zuverlässig reduziert, wohingegen in Einzelfällen eine Spezifikation aufgrund überlanger Partikel immer noch nicht möglich war. Dies kann sowohl an der gewählten Siebtechnik liegen, wenn z. B. Überlängen nicht separat durch das Sieb aussortiert werden, als auch an der Maschineneinstellung der jeweiligen Siebmaschine.

Die Frage, ob vor oder nach der Trocknung gesiebt werden sollte, lässt sich nicht eindeutig beantworten. Die Siebung von trockenen Holzhackschnitzeln führte häufig zu einer deutlicheren Reduzierung des Feinanteils und des Aschegehalts als die Siebung frischer Brennstoffe. Die Siebung ist, bezogen auf die Produktionskosten, ein in den meisten Fällen günstigeres Verfahren als die Trocknung. Somit könnte eine vorangeschaltete Siebung von frischen Holzhackschnitzeln deren i. d. R. deutlich teurere Trocknung unterstützen, wenn v. a. bei technischen Trocknungs-

verfahren eine geringere Brennstoffmenge dem Trockner zugeführt wird und die Belüftung durch das größere Porenvolumen erleichtert wird. Inwieweit die vorangegangene Siebung auch auf die natürliche Trocknung in Haufwerken einen positiven oder einen negativen Einfluss hat (z.B. aufgrund einer verminderten Wärmeentwicklung durch Reduzierung des Feinanteils gegenüber einer besseren Belüftung durch ein höheres Porenvolumen), ist aus den aktuellen Erkenntnissen noch nicht ableitbar.

Schlussendlich stellt sich auch die Frage, welchen Wassergehalt die ausgesiebten Materialien für die vorgesehene weitere Verwendung haben sollten, sei es zur Energieerzeugung, zur Kompostierung oder als Einstreu. Zu beachten ist bei der sekundären Brennstoffaufbereitung durch Siebung und Trocknung auch, dass nicht durch Unachtsamkeit beim Bewegen und Lagern der Brennstoffe ein Eintrag von Mineralboden stattfindet und es so statt zu einer Verbesserung der Brennstoffqualität zu einer Verschlechterung kommt. Neben einer guten Schulung der Arbeitskräfte sind deshalb die Verwendung befestigter Arbeitsflächen und das Sauberhalten derselben erforderlich.

Eine Klassifikation der Holzhackschnitzel nach DIN EN ISO 17225-4 (2021) war für unbehandeltes Waldrestholz insgesamt nicht möglich (hoher Feinanteil, häufig sehr hoher Aschegehalt etc.). Je nach Aufbereitung durch Siebung und Trocknung konnten die Holzhackschnitzel trotz des sehr heterogenen Ausgangsmaterials den Klassifikationen A1 bis B1 zugeordnet werden.

Besonders bei Waldrestholz bietet sich die Aufbereitung an, um Brennstoffqualitäten zu produzieren, welche einen störungsarmen Anlagenbetrieb gewährleisten können bzw. welche überhaupt erst verbrannt werden können (Reduktion des hohen Wassergehalts). Inwieweit die Aufbereitung das Emissionsverhalten von Kleinf Feuerungsanlagen positiv beeinflusst, wird separat in Kapitel 8 dargestellt.

7.2.8 Zusammenfassung Produktionskosten

In fünf von sechs Fallstudien wurden die Aufbereitungskosten von Holzhackschnitzeln mit verschiedenen Techniken und in unterschiedlichen Größen und Betriebsstrukturen ermittelt. Dafür wurden Durchsatzraten und Betriebskosten der eingesetzten Maschinen bestimmt. Dies geschah im Rahmen von relativ kurzen Arbeitseinsätzen. Die Ergebnisse können daher nur einen ersten Eindruck von den zu erwartenden Größenordnungen geben und sind nicht geeignet, die Wirtschaftlichkeit von verschiedenen Techniken oder Betriebskonzepten abschließend zu beurteilen.

Die Trocknung von Holzhackschnitzeln stellt einen erheblichen Kostenfaktor dar. Ein niedriger Wassergehalt kann jedoch eine Voraussetzung für den Marktzugang zu Betreibern von kleinen Feuerungsanlagen sein. Zudem sind trockene Holzhackschnitzel deutlich lagerstabiler als frische, sodass sie in größeren Mengen am Betriebshof vorgehalten und umgeschlagen werden können. Bei einer Vermarktung nach Energiemenge wird der Vorteil des gesteigerten Heizwerts im Anlieferungszustand beim Endkunden direkt umgesetzt. Bei einer Abrechnung nach Volumen oder Masse muss die Investition in den geringeren Wassergehalt über eine Preisstaffelung eingepreist werden.

Die kostengünstigste Trocknung war die natürliche Trocknung in Freilandhaufwerken (Fallstudie 5). Hierzu sind allerdings Lagerflächen in erheblichem Umfang notwendig. Die Wassergehalte bei Auslagerung lagen deutlich höher als die bei technischer

Trocknung gemessenen Werte. Bei der technischen Trocknung spielte der Stromverbrauch (hauptsächlich für die notwendigen Gebläse) neben den Wärmekosten die entscheidende Rolle. Großdimensionierte, hochtechnisierte Trocknungsanlagen zeigten einen geringen Betreuungsaufwand bei einer hohen möglichen Jahreslaufzeit. Hier kann sich auch eine Kombination mit anderen Trocknungsgütern, z.B. Futtermitteln wie in Fallstudie 6 anbieten, falls die notwendige Auslastung allein mit der Trocknung von Holzhackschnitzeln nicht möglich ist.

Die Trocknung sollte daher möglichst optimiert ablaufen. In den Fallstudien hat sich gezeigt, dass insbesondere von Bedeutung ist, das Erreichen des Zielwassergehalts verlässlich zu kontrollieren. Eine deutliche Unterschreitung des gewünschten Wassergehalts verringert den Durchsatz und führt daher zu unnötig erhöhten Trocknungskosten, die am Markt nicht automatisch realisiert werden können.

Das Sieben von Holzhackschnitzeln ist mit etablierten Techniken zu überschaubaren Kosten möglich. Eine Integration in weitreichendere Betriebskonzepte, in denen neben Holzhackschnitzeln noch weitere Güter gesiebt werden, erscheint auch hier sinnvoll, um die Auslastung der Maschinen sicherzustellen. Ein großes und leistungsstarkes Sieb (z.B. Multistar M des Herstellers Komtech in Fallstudie 2) allein mit der Produktion von hochwertigen Holzhackschnitzeln auszulasten, ist, ähnlich wie bei den Trocknern, bei regionalen Vermarktungsstrukturen mit begrenzten Lieferdistanzen nicht immer möglich. Bei jedem Wechsel des zu siebenden Materials (Holzhackschnitzel, Kompost etc.) muss zur Vermeidung von Verunreinigungen auf eine sorgfältige Trennung der Materialien geachtet werden. Beispielsweise weist Kompost einen deutlich höheren Aschegehalt auf als Holzhackschnitzel. Das gleiche gilt auch für die Nutzung derselben Trocknungsanlagen oder Transporteinrichtungen für unterschiedliche Materialien.

Gerade auf weitläufigen Betriebsgeländen (z.B. in Fallstudie 5 mit Trocknung in Haufwerken) waren mobile Siebmaschinen vorteilhaft, da Transportwege reduziert werden konnten. Stationäre Anlagen eignen sich besonders, wenn sie gekoppelt an weitere Prozessschritte laufen sollen oder wenn sie direkt aus Transportbehältern befüllt werden können. Die sonstigen Kosten, die in jedem Betrieb anfallen, können bei einem breiter angelegten Betriebskonzept auf mehr Produkte in höherer Menge umgelegt werden. Durch eine Kopplung von Prozessschritten wird weitestgehend eine Automatisierung der Abläufe ermöglicht, was den Arbeitsaufwand reduzieren kann. Hier werden jedoch unterschiedlich schnell laufende Prozesse kombiniert, sodass dies nicht in jedem Fall sinnvoll ist. Die zusätzliche Integration der Produktion von Qualitätshackschnitzeln in bestehende Betriebskonzepte scheint besonders interessant. Die Ausbeute an diesem Hauptprodukt lag in den Fallstudien mit Siebung zwischen 57 und 89 m-% des Ausgangsmaterials (bezogen auf die Trockenmasse). Entsprechend wichtig ist es, auch für die Nebenprodukte eine sinnvolle Verwendung zu finden. Die an den Fallstudien beteiligten Betriebe gehen hier unterschiedliche Wege. Der Feinanteil findet z.B. als Einstreu in Tierhaltungsbetrieben Verwendung oder wird zu Presslingen verarbeitet. Mögliche innerbetriebliche Verwendungen sind die Zuführung in die Biogaserzeugung oder die Kompostierung. Überlängen können als Brennstoff für Kunden mit größeren Anlagen vermarktet werden oder in den Hackprozess rückgeführt werden.



KAPITEL 8

Emissionsverhalten von aufbereiteten
Waldrestholzhackschnitzeln



8 EMISSIONSVERHALTEN VON AUFBEREITETEN WALDREST-HOLZHACKSCHNITZELN

Der störungsfreie und emissionsarme Betrieb von Hackschnitzelheizungen < 100kW erfordert neben einer guten Feuerungstechnik und einem geschulten Betreiber eine definierte, hochwertige Brennstoffqualität. Die Brennstoffqualität hat einen wesentlichen Einfluss auf das Abbrand- und Emissionsverhalten in einer Feuerung. Heterogene Rohmaterialien, wie z.B. Holzhackschnitzel aus frischem Waldrestholz, sind aufgrund der vergleichsweise hohen Wasser- und Aschegehalte sowie aufgrund eines relativ hohen Feinanteils und eines hohen Anteils an verbrennungskritischen Elementen (z.B. Stickstoff, Kalium) für den direkten Einsatz in kleinen Feuerungsanlagen nur bedingt geeignet. Entsprechend ergibt sich durch die sekundäre Brennstoffaufbereitung, welche die Qualität des Einsatzmaterials optimiert, z.B. mittels Siebung und technischer Trocknung, die Möglichkeit, zur Emissionsminderung beizutragen. Im folgenden Abschnitt soll anhand von Verbrennungsversuchen in zwei modernen Hackschnitzelfeuerungsanlagen das Potenzial der Verbesserung der Holzhackschnitzelqualität aufgezeigt werden, um die Anforderungen der 1. BImSchV an eine emissionsarme Verbrennung einzuhalten. Hierzu kamen die Ausgangsmaterialien sowie die aufbereiteten Holzhackschnitzelsortimente aus den sechs Fallstudien, welche in Kapitel 7 vorgestellt wurden, zum Einsatz.

8.1 Durchführung der Verbrennungsversuche

Zunächst wurde mit Kessel 1 der Einfluss auf das Abbrand- und Emissionsverhalten von Holzhackschnitzeln aus Sägereistholz untersucht und für den Vollast- und Teillastbetrieb optimiert. Im Anschluss wurden die aufbereiteten und nicht aufbereiteten Waldrestholzhackschnitzel in der optimierten Feuerungsanlage verbrannt. Zusätzlich wurde zum Vergleich eine zweite Anlage (Kessel 2) eingesetzt. Daher bilden diese Ergebnisse einen optimierten Vollastbetrieb ab. Die Ergebnisse aus den Emissionsmessungen geben Auskunft über die Qualität der Verbrennung und über die Herausforderung bei der Einhaltung der Emissionsgrenzwerte im Rahmen der 1. BImSchV. Die eingesetzten Kesselanlagen sowie die Ergebnisse der Abbrandversuche und Emissionsmessungen werden in diesem Kapitel dargestellt.

Eingesetzte Feuerungsanlagen

Kessel 1 verfügt über eine Nennwärmeleistung von 50kW und ist für Holzhackschnitzel, Pellets und Späne geeignet. Der Brennstoff wird seitlich auf einen Kipprost eingeschoben, der in regelmäßigen Abständen von der anfallenden Asche abgereinigt wird. Der Brennstoff wird automatisch mittels Heißluftgebläse gezündet. Die Brennstoffzufuhr sowie die Primär- und Sekundärluft werden unabhängig voneinander über einen Brennraumtemperaturfühler und eine Lambdasonde geregelt (siehe Tabelle 8.1). Die Abreinigung der Wärmetauscherflächen erfolgt automatisch mit integrierten Abreinigungsturbulatoren.

Tabelle 8.1: Spezifikation Kessel 1

Kessel 1	
Feuerungsprinzip	Kipprost mit seitlichem Einschub
Nennwärmeleistung	50 kW
Zündung	automatisch mit Zündgebläse
Brennstoffeinschub	automatisch durch Förderschnecke
Feuerungsanlagenregelung	Leistungs- und Verbrennungsregelung
Holzhackschnitzelqualität laut Hersteller	Wassergehalt < 31 m-% (Herstellerangabe: Holzfeuchte < 45 m-%), Partikelgröße P31S nach DIN EN ISO 17225 (2014)

Kessel 2 verfügt über einen beweglichen Treppenrost und eine gestufte Primär- und Sekundärluftzufuhr (siehe Tabelle 8.2). Die Primärluft wird der Brennkammer über den Rost zugeführt. Die Sekundärluft wird dem Verbrennungsgas in der Ausbrandzone tangential zugeführt, um eine gute Durchmischung und einen optimalen Gasausbrand in der Sekundärzone zu erreichen. Der Brennstoff wird mittels Heißluftgebläse automatisch auf dem beweglichen Treppenrost gezündet, der während der Verbrennung eine automatische Rostreinigung, Bewegung im Glutbett und Ascheabtransport gewährleistet. Die Anlage verfügt über eine elektronische Verbrennungsregelung mittels Lambdasonde. Die heißen Verbrennungsgase werden mithilfe eines Saugzuges über einen selbstreinigenden Rohrbündelwärmeübertrager in den Schornstein abgeleitet.

Tabelle 8.2: Spezifikation Kessel 2

Kessel 2	
Feuerungsprinzip	beweglicher Treppenrost
Nennwärmeleistung	30 kW
Zündung	automatisch mit Zündgebläse
Brennstoffeinschub	automatisch durch Förderschnecke
Feuerungsanlagenregelung	Leistungs- und Verbrennungsregelung
Holzhackschnitzelqualität laut Hersteller	Wassergehalt < 30 m-%, Partikelgröße P16B oder P45A (sehr gute Qualität) nach DIN EN 14961-4

Abbrandversuche und Emissionsmessungen

Für die Verbrennungsversuche wurden beide Feuerungen in ein Heizwärmenetz eingebunden, um einen kontinuierlichen Anlagenbetrieb zu ermöglichen. Da die verwendeten Feuerungsanlagen laut Herstellerangaben nur mit Holzhackschnitzeln bis zu einem Wassergehalt von ca. 30 m-% emissionsarm und störungsfrei betrieben werden können, wurden die Holzhackschnitzelproben aus den frischen Ausgangsmaterialien, welche i. d.R. deutlich höhere Wassergehalte aufwiesen, mittels Niedrigtemperatur-Satztrocknerboxen auf Werte von ca. 30 m-% reduziert. Daher entsprechen die Wassergehalte des frischen Rohmaterials in Kapitel 7 nicht den Wassergehalten bei den Feuerungsversuchen. In der Regel wurden die Verbrennungsversuche bei Volllast unter möglichst stationären Bedingungen durchgeführt. Abgasseitig wurden die Kessel an eine geeignete Messstrecke angeschlossen, um alle relevanten Emissionsmessgrößen und Anlagenparameter zu erfassen. Dazu gehörte

die Analyse der Abgase hinsichtlich Kohlenstoffmonoxid (CO) und den Stickstoffoxiden (NO_x) nach DIN EN 303-5 sowie dem Gesamtstaub nach VDI 2066 Blatt 1. Die gemessenen Emissionswerte wurden ohne Abzug einer Messunsicherheit entsprechend der 1. BImSchV auf das Abgasvolumen im Normzustand (0 °C, 1.013 hPa) nach Abzug des Feuchtegehaltes und auf einen Sauerstoffgehalt von 13 Vol-% bezogen.

Zu beachten ist bei der Interpretation der hier dargestellten Ergebnisse, dass die Versuche im Jahr 2016 durchgeführt wurden. Die Emissionswerte neu entwickelter Kessel mit modernen Verbrennungsansätzen oder mit integrierten, sekundären Emissionsminderungsmaßnahmen liegen erfahrungsgemäß teils deutlich unter den Werten der in diesem Versuch verwendeten Kessel.

8.2 Feuerungsseitige Optimierungspotenziale

Im Rahmen von aufwendigen Vorversuchen an Kessel 1 wurden die Einstellungen variiert, um einen möglichst emissionsarmen Betrieb in Voll- sowie in Teillast zu realisieren. Hierzu wurde Sägerestholz mit zwei verschiedenen Wassergehaltsstufen und einem jeweils relativ niedrigen Aschegehalt eingesetzt. Wie Abbildung 8.1 zeigt, konnten durch die optimierten Einstellungen beispielsweise die CO-Emissionen von 150 mg/m³ auf 40 mg/m³ für Brennstoff 1 reduziert werden. Mit der ungünstigsten Kessel-einstellung (A) wurden im Vergleich dazu ca. 250 mg/m³ an CO freigesetzt. Für Brennstoff 2 kam es nur zu einer geringfügigen Verbesserung der Emissionswerte im Vergleich zur Standardeinstellung des Kessels im Auslieferungszustand.

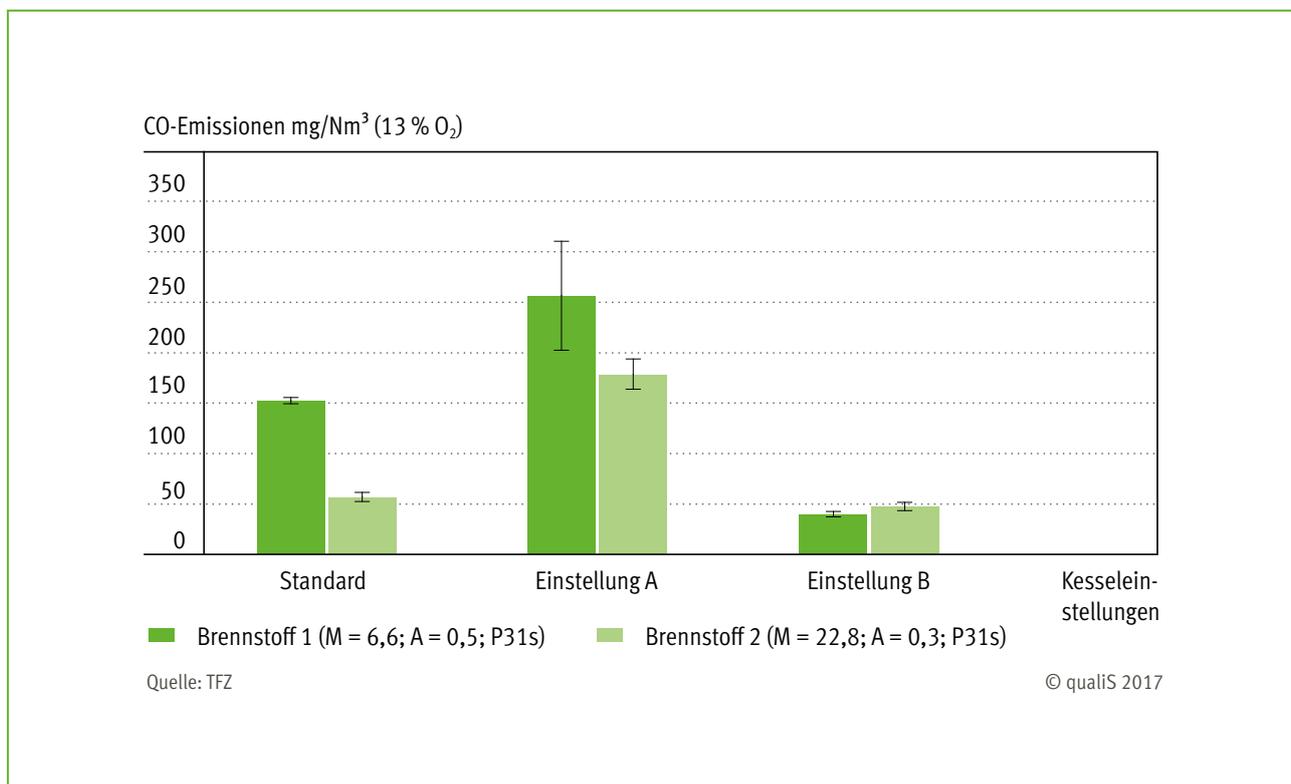


Abbildung 8.1: Mittlere CO-Emissionen bei der Verbrennung von zwei Brennstoffen mit verschiedenen Einstellungen an Kessel 1 (± Standardabweichung)

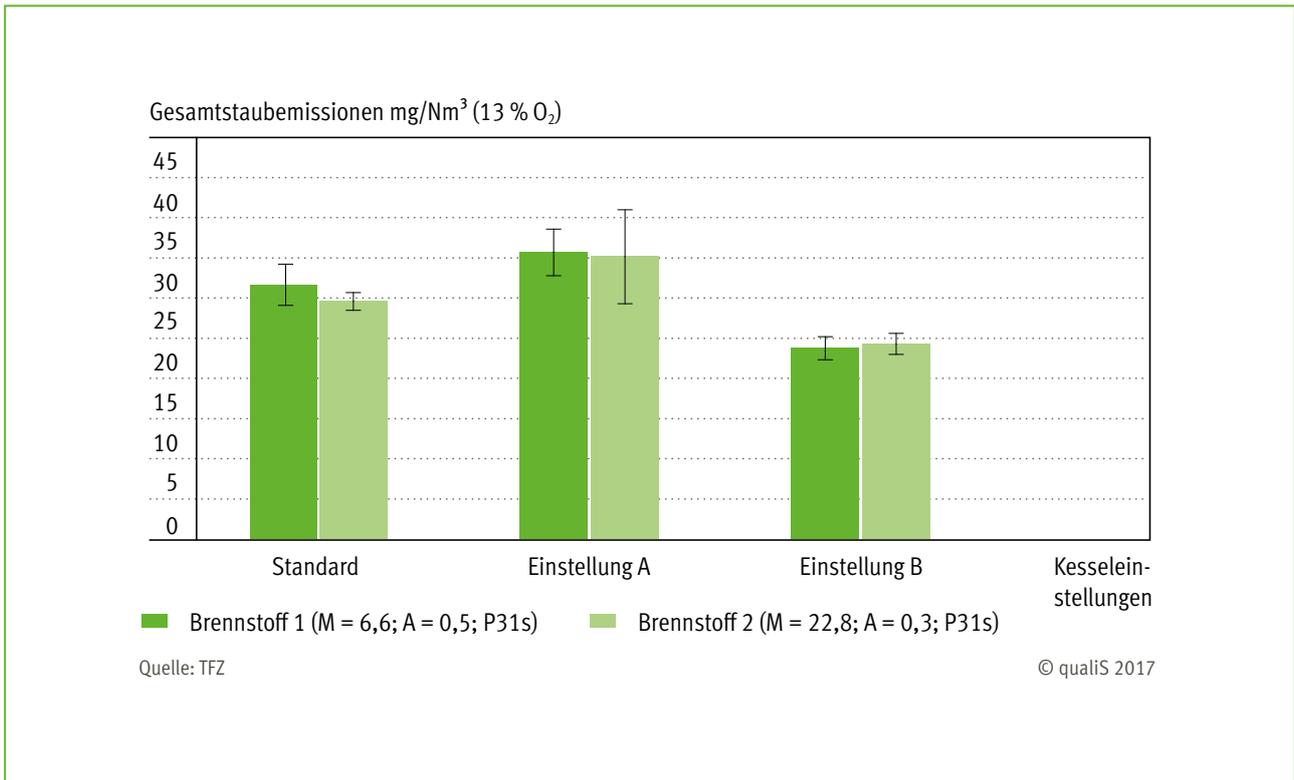


Abbildung 8.2: Mittlere Gesamtstaubemissionen bei der Verbrennung von zwei Brennstoffen mit verschiedenen Einstellungen an Kessel 1 (\pm Standardabweichung)

Der Einfluss auf die Gesamtstaubemissionen war für Kessel 1 nach der Kesseloptimierung weniger stark ausgeprägt (siehe Abbildung 8.2). Dennoch kann diese Optimierung auch in Hinblick auf die wiederkehrenden Schornsteinfegermessungen von entscheidender Bedeutung sein, wenn der vorgegebene Grenzwert von 0,02 g/m³ für Gesamtstaub eingehalten werden soll.

Diese Ergebnisse bestätigen, dass ein Holzhacksnitzelkessel immer an den jeweiligen Brennstoff anzupassen ist, um einen emissionsarmen und störungsfreien Betrieb zu gewährleisten.

8.3 Brennstoffseitige Optimierungspotenziale

In diesem Abschnitt wird aufgezeigt, inwieweit sekundäre Aufbereitungsschritte von Waldrestholzhackschnitzeln beim optimierten Feuerungsanlagenbetrieb dazu beitragen können, die Emissionsgrenzwerte der Stufe 2 der 1. BImSchV einzuhalten. Insgesamt konnte im besten Fall eine Klassifikation A1 bis B1 nach DIN EN ISO 17225-4 (2021) erreicht werden, siehe Kapitel 7. Die Feuerungsversuche wurden unter Vollastbedingungen durchgeführt, wobei die optimierten Kesseleinstellungen verwendet und i. d. R. nicht verändert wurden.

CO-Emissionen

Erhöhte Werte von Kohlenstoffmonoxid (CO) im Abgas von Feuerungsanlagen zeigen die Unvollständigkeit des Ausbrands der Verbrennungsgase an und kennzeichnen einen suboptimalen Verbrennungsprozess. Zur Vermeidung von erhöhten

CO-Emissionen lassen sich folgende allgemeine Betriebsbedingungen ableiten:

- ausreichend hohe Verbrennungstemperaturen (> 800 °C)
- ausreichend lange Verweilzeit der Verbrennungsgase
- genügend Luftsauerstoff durch Primär- und Sekundärluftzufuhr gute Durchmischung des Verbrennungsgases mit Luftsauerstoff

Aufgrund der vorangegangenen Kesseloptimierungen kann davon ausgegangen werden, dass die o.g. Betriebsbedingungen weitestgehend eingehalten wurden, was der stabile Versuchsbetrieb bestätigte. Ebenso konnten keine Verschlackungen im Feuerraum beobachtet werden. In vielen Fällen konnten die CO-Emissionen im Vergleich zum Ausgangsmaterial auf ein niedrigeres Niveau reduziert werden, jedoch nicht bei allen Fallstudien. Es ist anzumerken, dass das Ausgangsmaterial für die Feuerungsversuche stets auf unter 30 m-% Wassergehalt getrocknet wurde. Nachfolgend werden zunächst die Ergebnisse für den Kessel 1 aufgezeigt (siehe Abbildung 8.3). Für Fallstudie 1 zeigte sich aufgrund der Trocknung und anschließenden Siebung eine deutliche Reduzierung der CO-Emissionen von durchschnittlich 109 auf 68 mg/m³. Bei Fallstudie 2 wurde das erste Endprodukt (2-E1) zunächst gesiebt und anschließend getrocknet, was eine Verringerung um 40% von 71 auf 42 mg/m³ bewirkte, wobei der Wassergehalt für die Feuerungsversuche für 2-A bei 34 und 2-E1 bei 4,3 m-% lag. Im Vergleich dazu wurden leicht höhere CO-Emissionen für das zweite Endprodukt 2-E2 nachgewiesen, welches durch Trocknung und anschließende Siebung hergestellt wurde. In Fallstudie 3 kamen zwei verschiedene Ausgangsmaterialien zum Einsatz, die zu unterschiedlichen CO-Emis-

sionsniveaus führten. Während die frischen Holzhackschnitzel lediglich gesiebt wurden, verringerten sich die CO-Emissionen dennoch von 150 auf 84 mg/m³. Das zweite Ausgangsmaterial wurde vor dem Versuch in einem Haufwerk getrocknet und anschließend gesiebt, was in diesem Fall aber zu keiner Reduktion der Emissionen führte. Dies könnte an den immer noch recht hohen Wassergehalten von 39 bzw. 33 m-% liegen, die keinen stabilen Versuchsbetrieb bei Kessel 1 zuließen. Die Trocknung der Holzhackschnitzel mittels Schubdetrockner aus der vierten Fallstudie bewirkte keine Verringerung der CO-Emissionen, da sowohl der Aschegehalt als auch der Feinanteil des Ausgangsmaterials und Endproduktes auf einem vergleichbaren Niveau lagen. Die Wassergehalte für die Verbrennungsversuche lagen bei 28 bzw. 8 m-%. Für die Aufbereitungsketten in Fallstudie 5 konnten beim Einsatz in Kessel 1 keine Verringerungen der CO-Emissionen erzielt werden. Im Gegensatz dazu konnte in der letzten Fallstudie wieder eine Verbesserung des Emissionsverhaltens aufgrund der Siebung und damit die Reduktion des Aschegehaltes und des Feinanteils erreicht werden.

Bei Kessel 2 konnte eine Verringerung der CO-Emissionen in einem Fall sogar um bis zu 97 % erreicht werden (siehe Abbildung 8.4). Beim Einsatz von aufbereiteten Holzhackschnitzeln in Kessel 2 wurden je nach Fallstudie mittlere CO-Emissionen von bis zu 1.269 mg/m³ bzw. 446 mg/m³ (Fallstudie 3 bzw. 6) ermittelt. Bei den anderen Verbrennungsversuchen wurden CO-Emissionen von maximal 315 mg/m³ gemessen. Im Unterschied dazu liegen die mittleren CO-Emissionen in Kessel 1 mit maximal 270 mg/m³ deutlich unter denen für Kessel 2 und stets

unter dem Emissionsgrenzwert der Stufe 2 der 1. BImSchV von 0,40 g/m³.

Die erhöhten CO-Emissionen in Kessel 2 sind vor allem darauf zurückzuführen, dass ein Wassergehalt von unter 30 m-% trotz Trocknung vor den Verbrennungsversuchen nicht immer gewährleistet werden konnte (siehe Kapitel 8.1.) und die erhöhten Werte den vom Hersteller vorgegebenen maximalen Wassergehaltswert von 30 m-% zum Teil deutlich überschritten (siehe Abbildung 8.5). Eine Einhaltung des maximalen Brennstoffwassergehaltes kann daher eine wichtige Voraussetzung sein, um einen Anlagenbetrieb mit niedrigen CO-Emissionen zu gewährleisten. Bei Kessel 1, der nach Herstellerangaben nur für Brennstoffe bis zu einem Wasserhalt von 31 m-% geeignet ist, wurde kein so ausgeprägter Einfluss des Wassergehaltes beobachtet. Dieser Kessel scheint etwas robuster gegenüber einem erhöhten Wassergehalt im Brennstoff zu sein. Wichtig ist dabei auch eine optimierte Korngrößenverteilung im Brennstoff, die zu einem störungsarmen Feuerungsanlagenbetrieb beiträgt.

NO_x-Emissionen

Bei Biomassefeuerungen ist der Stickstoffgehalt des Brennstoffes der wichtigste Parameter für die Stickoxidbildung. Unabhängig vom Verbrennungsprinzip konnte der Zusammenhang zwischen steigendem Brennstoffstickstoffgehalt und einer Zunahme der NO_x-Emissionen bei einer vollständigen Verbrennung bereits mehrfach nachgewiesen werden [8-1].

Die Aufbereitung der Waldrestholzhackschnitzel hatte einen direkten Einfluss auf das NO_x-Emissionsverhalten bei Verbren-

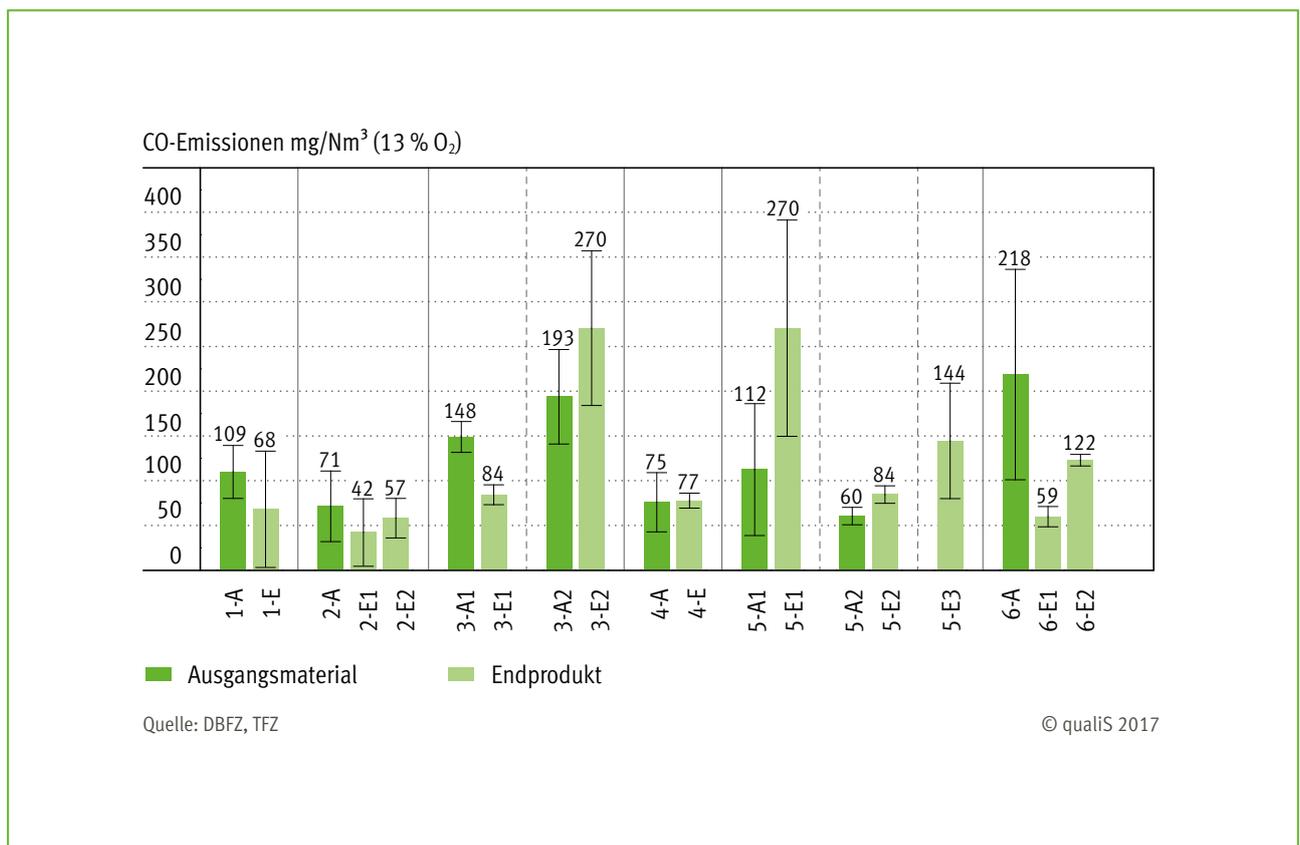


Abbildung 8.3: Mittlere CO-Emissionen bei der Verbrennung unterschiedlicher Waldrestholzhackschnitzel aus sechs Fallstudien in Kessel 1 (± Standardabweichung, Zahlenwerte geben den Mittelwert wieder)

nungsversuchen. Beim Betrieb von Kessel 1 wurde durch den Einsatz vom Ausgangsmaterial der Fallstudie 5 der höchste Wert für die mittleren NO_x -Emissionen von 459 mg/m^3 nachgewiesen (siehe Abbildung 8.6). Im Unterschied dazu liegen die mittleren NO_x -Emissionen in Kessel 2 bei maximal 297 mg/m^3 für das Ausgangsmaterial in Fallstudie 5 (nicht dargestellt). Oftmals lagen die NO_x -Emissionen für Kessel 1 höher als für Kessel 2. Aufgrund der mechanischen Aufbereitung und der Absiebung des Feinanteils kam es in den meisten Fällen zu einer Reduzierung der mittleren NO_x -Emissionen um bis zu 30,5 % (Kessel 1) bzw. 28,7 % (Kessel 2), wobei die in Fallstudie 6 (Kessel 2) bzw. Fallstudie 2 (Kessel 1) vorgenommenen sekundären Brennstoffaufbereitungsmaßnahmen den größten Effekt zeigten. Da in der 1. BImSchV keine Grenzwerte für NO_x -Emissionen beim Betrieb von Feuerungsanlagen festgelegt sind, wird der derzeit gültige NO_x -Grenzwert der 44. BImSchV von 197 mg/m^3 (bezogen auf 13 % Vol-O_2) für den Einsatz von naturbelassenem Holz in genehmigungsbedürftigen Anlagen mit einer Feuerungswärmeleistung von 1 bis 5 MW für eine Einschätzung herangezogen. Alternativ könnte der Raumheizungs-Jahres-Emissionswert nach der Europäischen Ökodesignrichtlinie für Anlagen $< 500 \text{ kW}$ von 145 mg/m^3 (bei 13 % Vol-O_2) herangezogen werden. Da sich dieser Wert allerdings auf einen rechnerischen Wert aus 15 % Voll- und 85 % Teillast und nur auf Prüfstandsbedingungen, nicht jedoch auf den Realbetrieb bezieht, ist ein direkter Vergleich mit den hier erhobenen Werten nicht möglich. Die Ergebnisse zeigten, dass eine Einhaltung des NO_x -Emissionsgrenzwertes der 44. BImSchV durch eine sekundäre Brennstoffaufbereitung im Einzelfall erzielt werden kann (z. B. für Kessel 2 beim Einsatz vom Endprodukt 6-E1, nicht dargestellt). Für Kessel 1 konnte der NO_x -Grenzwert der 44. BImSchV dagegen

in keinem Fall eingehalten werden. Die Brennstoffaufbereitung ist vor allem dann sinnvoll, wenn technische Maßnahmen zur sekundären NO_x -Minderung nicht wirtschaftlich sind. Die Verringerung der NO_x -Emissionen ist dabei direkt auf eine Reduzierung des Stickstoffgehalts im Brennstoff, z. B. durch das Absieben des Nadelanteils zurückzuführen (siehe Kapitel 7).

Gesamtstaubemissionen

Bei der Verbrennung von Holz hackschnitzeln kommt es zur Bildung und Freisetzung von Staubpartikeln. Diese partikelförmigen Emissionen können prinzipiell über mehrere Wege aus Produkten bei der vollständigen bzw. unvollständigen Verbrennung entstehen [8-2]. Die Bildung der Partikelemissionen bei einer vollständigen Verbrennung steht in direktem Zusammenhang mit der Brennstoffzusammensetzung. Die Hauptbestandteile der bei der vollständigen Verbrennung gebildeten partikelförmigen Emissionen sind Ascheverbindungen (sogenannte Aerosole), die durch Verdampfung (z. B. hauptsächlich von Kalium- und Natriumverbindungen) und Kondensation oder Neubildung in der Feuerung entstehen, sowie schwerflüchtige, mineralische Aschebestandteile, die durch die Verbrennungsluft aus dem Feuerraum mitgerissen werden.

Die aus der Literatur bekannte Korrelation der Gesamtstaubemissionen mit inhaltstofflichen Parametern (d. h. Kalium, Natrium, Chlor, Schwefel, Blei und Zink) [8-3], [8-4] konnte bei den durchgeführten Verbrennungsversuchen nicht bestätigt werden. Ansonsten hätte es bei den Verbrennungsversuchen mit aufbereiteten Waldrestholz hackschnitzeln im Vergleich zum korrespondierenden Ausgangsmaterial stets zu einer Reduktion der Gesamtstaubemissionen kommen müssen, da die Summe an Aerosolbildnern mit jeder Aufbereitungsstufe abnahm (siehe

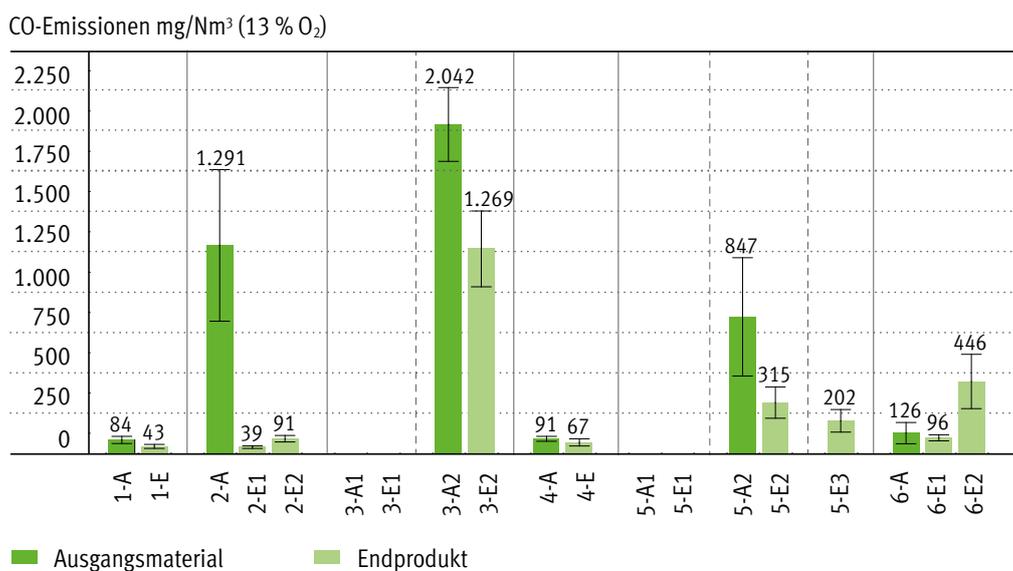


Abbildung 8.4: Mittlere CO-Emissionen bei der Verbrennung unterschiedlicher Waldrestholz hackschnitzeln aus sechs Fallstudien in Kessel 2 (\pm Standardabweichung, Zahlenwerte geben den Mittelwert wieder)

jeweilige Tabelle zu den Brennstoffqualitäten der einzelnen Fallstudien in Kapitel 7). Eine Einhaltung des Emissionsgrenzwertes für Gesamtstaub der 1. BImSchV von $0,02 \text{ g/m}^3$ (bezogen auf 13 Vol-% O_2) konnte nur in der Fallstudie 6 für das aufbereitete Endprodukt (6-E1) mit 16 mg/m^3 in Kessel 2 erreicht werden.

Für alle anderen Ausgangsmaterialien oder aufbereiteten Brennstoffchargen wurden mittlere Gesamtstaubemissionen von mindestens 37 mg/m^3 für Kessel 1 bzw. 31 mg/m^3 für Kessel 2 (jeweils das Ausgangsmaterial der Fallstudie 1) gemessen (siehe Abbildung 8.7 und 8.8).

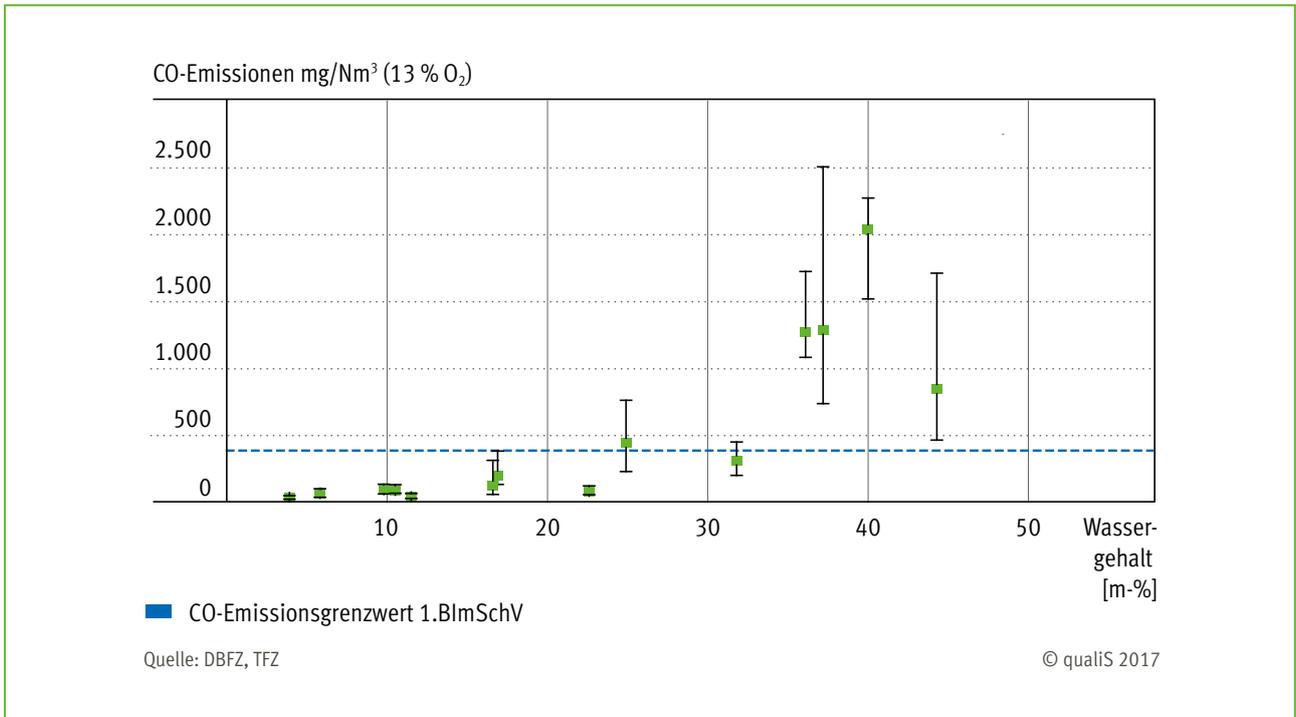


Abbildung 8.5: Mittlere CO-Emissionen in Abhängigkeit vom mittleren Wassergehalt bei der Verbrennung unterschiedlicher Waldrestholzhackschnitzel aus sechs Fallstudien in Kessel 2 (\pm Min-/Max-Werte)

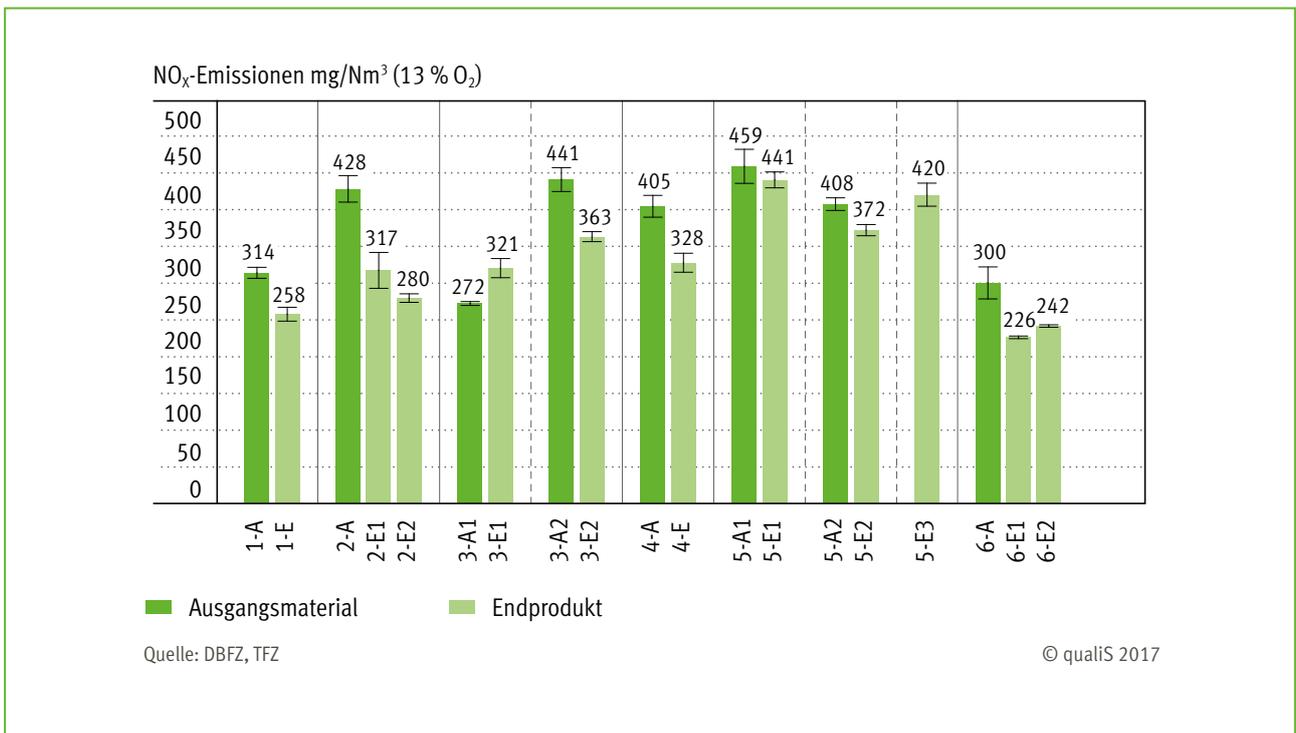


Abbildung 8.6: Mittlere NO_x -Emissionen bei der Verbrennung unterschiedlicher Waldrestholzhackschnitzel aus sechs Fallstudien in Kessel 1 (\pm Standardabweichung, Zahlenwerte geben den Mittelwert wieder)

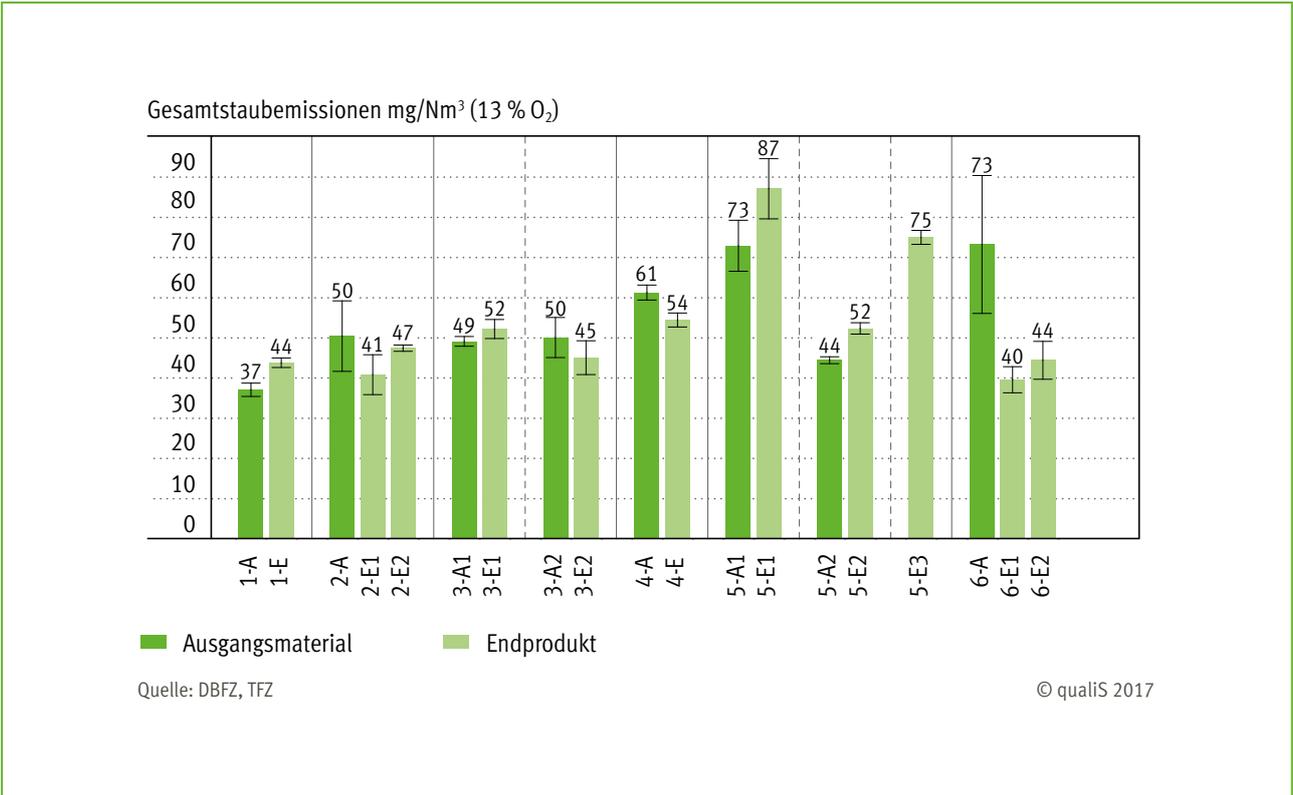


Abbildung 8.7: Mittlere Gesamtstaubemissionen bei der Verbrennung unterschiedlicher Waldrestholzhackschnitzel aus sechs Fallstudien in Kessel 1 (± Standardabweichung, Zahlenwerte geben den Mittelwert wieder)

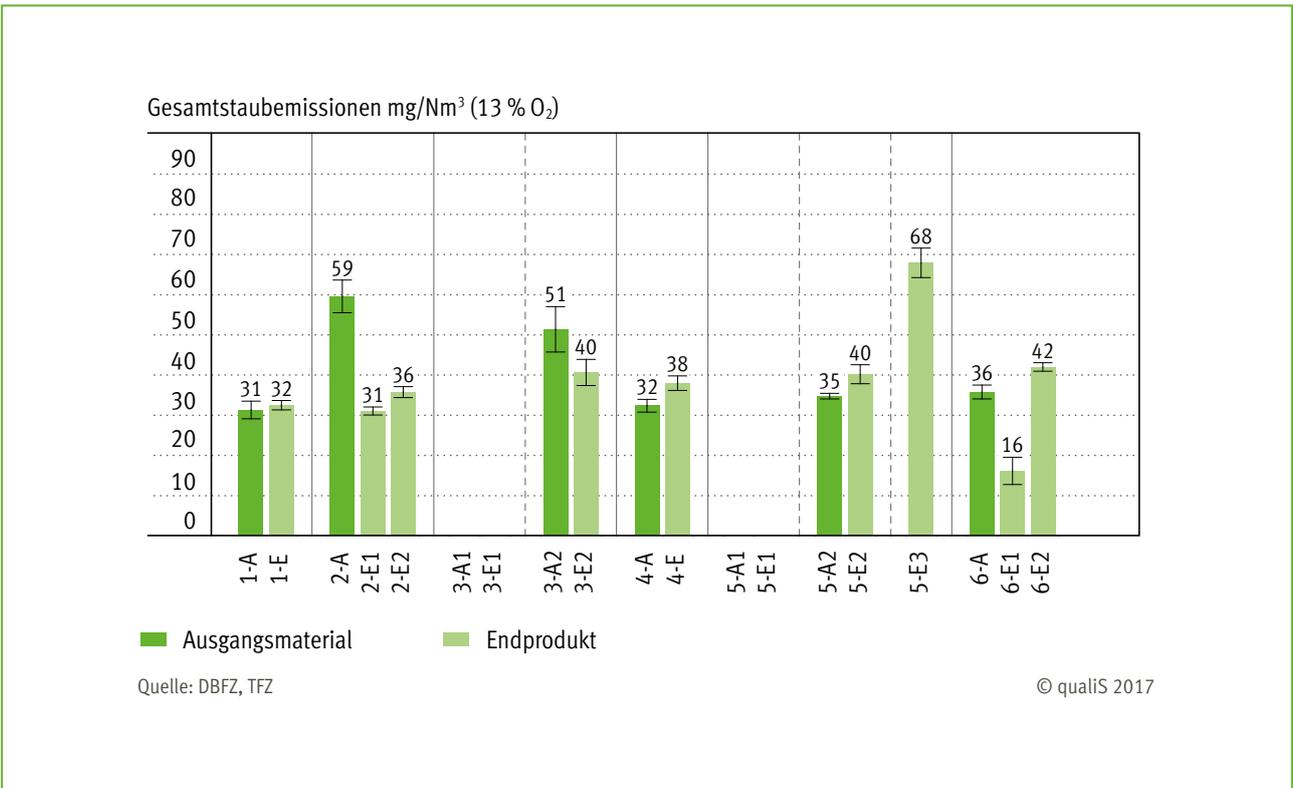


Abbildung 8.8: Mittlere Gesamtstaubemissionen bei der Verbrennung unterschiedlicher Waldrestholzhackschnitzel aus sechs Fallstudien in Kessel 2 (± Standardabweichung, Zahlenwerte geben den Mittelwert wieder)

Beim Einsatz aufbereiteter Waldrestholzhackschnitzel der Fallstudien 2 und 6 zeigt sich im Vergleich zu den Ausgangsmaterialien eine Reduzierung der Gesamtstaubemissionen in beiden Feuerungsanlagen. Im Unterschied dazu konnte für beide Feuerungsanlagen keine Reduzierung der Gesamtstaubemissionen durch eine sekundäre Aufbereitung in den Fallstudien 1 und 5 nachgewiesen werden. Gegenläufige Trends wurden beim Einsatz der aufbereiteten Brennstoffe aus den Fallstudien 3 und 4 in beiden Feuerungsanlagen beobachtet. Um eine sichere Einhaltung des Gesamtstaubemissionsgrenzwertes in Feuerungsanlagen kleinerer Leistung zu gewährleisten, muss daher untersucht werden, ob ggf. durch eine weitere Optimierung der sekundären Brennstoffaufbereitung von Waldrestholz zur Erreichung einer A1 Produktqualität nach ISO 17225-2 (für Holzpellets) bzw. eine Reduzierung des Aschegehalts auf Werte $\leq 1,0\text{ m}\%$ ein zusätzliches Emissionsminderungspotenzial geschaffen werden könnte. Ob dies jedoch ausreicht oder zusätzlich ein Staubabscheider installiert werden muss, ist individuell zu klären und zu entscheiden. Die durch die sekundäre Brennstoffaufbereitung realisierbare Verringerung der Staubbelastung im Abgas hätte jedoch einen positiven Einfluss auf den Betrieb eines Staubabscheiders.

8.4 Zusammenfassung und Empfehlungen für Nutzer von Feuerungen mit Qualitäts-hackschnitzeln aus Waldrestholz

Als Brennstoffe wurden nicht aufbereitete und aufbereitete Waldrestholzhackschnitzel in einer 50 kW Kipprost- und einer 30 kW Treppenrostfeuerung (Kessel 1 bzw. 2) verbrannt und hinsichtlich ihres Emissionsverhaltens analysiert. Anhand der Verbrennungsversuche konnte Folgendes gezeigt werden:

I. Einfluss der Einstellung der Feuerungsanlage

- Eine optimale Einstellung der Feuerungsanlage kann zu einer deutlichen Reduktion der Emissionen führen. Daher ist idealerweise eine Optimierung auf die vorliegende Brennstoffqualität durchzuführen.

II. Die Brennstoffaufbereitung sichert einen störungsarmen Anlagenbetrieb und wirkt sich meist positiv auf einen vollständigen Ausbrand und die daraus resultierenden CO-Emissionen der Feuerungen aus.

- Eine Einhaltung des CO-Emissionsgrenzwertes der 1. BImSchV von $400\text{ mg}/\text{m}^3$ konnte bis auf wenige Ausnahmen durch die sekundäre Brennstoffaufbereitung sichergestellt werden.
- Eine Einhaltung des vom Hersteller angegebenen maximalen Brennstoffwassergehaltes ist eine wichtige Voraussetzung, um einen Anlagenbetrieb mit niedrigen CO-Emissionen zu gewährleisten.

III. Es zeigte sich, dass durch eine sekundäre Brennstoffaufbereitung eine Verringerung der NO_x -Emissionen in Abhängigkeit vom eingesetzten Kessel erzielt werden kann.

- Die sekundäre Brennstoffaufbereitung ist vor allem dann sinnvoll, wenn technische Maßnahmen zur sekundären NO_x -Minderung wirtschaftlich nicht umsetzbar sind.
- Die Verringerung der NO_x -Emissionen ist direkt auf eine Reduzierung des Stickstoffgehalts, z. B. durch Reduzierung des Nadel- und Rindenanteils im Brennstoff zurückzuführen.

IV. Der Einfluss der Brennstoffaufbereitung auf die Höhe der Gesamtstaubemissionen konnte nicht abschließend geklärt werden.

- Eine Einhaltung strenger Emissionsgrenzwerte für Gesamtstaub (z. B. $0,02\text{ g}/\text{m}^3$ nach Stufe 2 der 1. BImSchV) ist bei der Verwendung von Waldrestholz nach einer sekundären Aufbereitung durch Siebung und Trocknung möglich, kann jedoch mit den verwendeten Feuerungen nicht immer gewährleistet werden.
- Dabei kann die sekundäre Brennstoffaufbereitung weitere Staubemissionsminderungsmaßnahmen (z. B. durch elektrostatische Staubabscheider besonders für Feuerungen im kleinen Leistungsbereich) unterstützen, wenn die Staubbelastung im Abgas reduziert wird.

Somit muss die Anwendung einer sekundären Brennstoffaufbereitung von Waldrestholzhackschnitzeln entsprechend den verfügbaren Holzsortimenten und in Abhängigkeit von der verfügbaren Feuerungstechnik individuell entschieden werden.

The background of the entire page is a close-up photograph of wood chips, which are small, irregular pieces of wood. The image is overlaid with a semi-transparent green filter, giving it a monochromatic appearance. The wood chips are scattered across the frame, with some in sharp focus and others blurred in the foreground and background.

KAPITEL 9 | 10

Qualitätsmanagement für die Holzhackschnitzel-
bereitstellung

Vereinfachte Methoden zur Selbstüberwachung
der Holzhackschnitzelqualität

9 QUALITÄTSMANAGEMENT FÜR DIE HOLZHACKSCHNITZELBEREITSTELLUNG

Für die Holzhackschnitzelherstellung und -bereitstellung ist die Einführung eines Qualitätsmanagements eine sinnvolle Maßnahme, um Brennstoffe gleichbleibender und nachvollziehbarer Qualität zu gewährleisten. Die DIN EN 15234-4 zur Qualitätssicherung von Holzhackschnitzeln bietet dabei eine gute Orientierungshilfe, wie die verschiedenen Aspekte identifiziert und umgesetzt werden können. Die Norm wurde auch als Grundlage für die in diesem Kapitel dargestellten Übersichten zu Mess- und Kontrollpunkten und Maßnahmen entlang der Bereitstellungskette verwendet.

Neben der Norm zur Qualitätssicherung von Holzhackschnitzeln dienen folgende Normen als Grundlage für das Qualitätsmanagement des gesamten Produktionsprozesses:

- DIN EN ISO 17225-1: Biogene Festbrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen
- DIN EN ISO 17225-4: Biogene Festbrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen – Teil 4: Klassifizierung von Holzhackschnitzeln
- DIN EN ISO 17225-9: Biogene Festbrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen – Teil 9: Klassifizierung von grobem Schredderholz und Holzhackschnitzeln für die industrielle Verwendung
- DIN EN 15234-4: Feste Biobrennstoffe – Qualitätssicherung von Brennstoffen – Teil 4: Holzhackschnitzel für nichtindustrielle Verwendung
- DIN EN ISO 21945: Biogene Festbrennstoffe – Vereinfachtes Verfahren zur Probenahme an kleinen Anlagen
- DIN EN ISO 18135: Biogene Festbrennstoffe – Probenahme
- DIN EN ISO 14780: Biogene Festbrennstoffe – Probenherstellung
- DIN EN ISO 17827-1: Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung der Partikelgrößenverteilung für unkomprimierte Brennstoffe – Teil 1: Horizontales Rüttelsiebverfahren mit Sieben mit einer Lochgröße von 3,15 mm und darüber
- DIN EN ISO 18134-2: Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung des Wassergehaltes – Ofentrocknung – Teil 2: Gesamtgehalt an Wasser – Vereinfachtes Verfahren

Die Möglichkeiten bei der Hackschnitzelproduktion und -aufbereitung sind für einzelne Hersteller kleiner Brennstoffchargen, v. a. für die sogenannten Selbstversorger mit eigenem Wald und

eigenem Hackschnitzelkessel beschränkt. Gerade auch in diesen Fällen sind hohe Ansprüche an eine gleichbleibende und gut charakterisierte Qualität des Brennstoffes sicherzustellen. Daher wird in Kapitel 10 beschrieben, welche vereinfachten Möglichkeiten Produzenten in kleineren Betrieben oder Selbstversorger zur Qualitätssicherung anwenden können. Der Aufwand dieser Methoden ist verhältnismäßig gering. Das Verfahren verläuft in Anlehnung an die oben genannten Normen und eine ausreichende Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Standardmethoden konnte nachgewiesen werden.

Das hier beschriebene Qualitätsmanagement zielt auf zwei Hackschnitzelproduktionslinien ab. Zum einen liegt der Fokus auf einer Bereitstellungskette mit Aufbereitung. Diese ist meistens vorzufinden, wenn der logistische Aufwand der Aufbereitung in einem angemessenen Verhältnis zu der zu verarbeitenden Menge an Holzhackschnitzeln steht. Das trifft vor allem auf Großhändler und Wiederverkäufer, wie beispielsweise Biomassehöfe, zu. Zum anderen wird die Bereitstellungskette ohne weitere Aufbereitungsschritte betrachtet. Diese ist dann vorzufinden, wenn eine Siebung und eine aktive Trocknung aus Platz-, Zeit- oder Aufwandsgründen nicht realisierbar ist. Ein typisches Beispiel dafür sind Selbstversorger mit eigenem Hackschnitzelkessel und eigenem Wald. Die Qualitätssicherung für die Hackschnitzelbereitstellung ohne Aufbereitung unterscheidet sich nur durch relativ wenige Prozessschritte von der Bereitstellungskette mit Aufbereitung.

Die Hackschnitzelbereitstellung kann allgemein in drei Hauptprozesse nach DIN EN 15234-4 unterteilt werden (siehe Abbildung 9.1). Der erste ist die Bereitstellung von Rohstoffen, an den sich die Herstellung der Holzhackschnitzel als zweiter Prozessschritt anschließt. Dieser beinhaltet neben dem eigent-

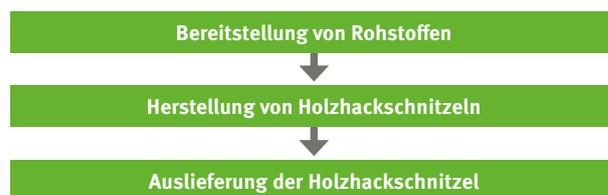


Abbildung 9.1: Aufteilung der Lieferkette von Holzhackschnitzeln nach DIN EN 15234-4

lichen Hacken auch die Aufbereitung durch Trocknung und Siebung. Einzelne Aufbereitungsschritte wie Siebung, technische Trocknung oder eine Zwischenlagerung finden meist nur bei kommerziellen Hackschnitzelbereitstellern statt. Bei Selbstversorgern oder kleinen Hackschnitzelproduzenten erfolgt nach dem Hacken, falls keine Abwärmenutzung einer Biogasanlage möglich ist, häufig lediglich eine natürliche Trocknung durch Lagerung bis zum Verbrauch. Der letzte Prozessschritt ist die Auslieferung der Holzhackschnitzel zum Endkunden.

9.1 Schritte der Qualitätssicherung

Da in diesem Handbuch die Herstellung qualitativ hochwertiger Holzhackschnitzel für die Verwendung in kleinen Feuerungen bis zu einer Größe von 1 MW im Vordergrund steht, sind vor allem folgende Parameter der DIN EN ISO 17225-4 maßgeblich:

- Wassergehalt
- Partikelgrößenverteilung
- Aschegehalt

Die drei Parameter sind auch ausschlaggebend, um die Brennstoffqualitätsvorgaben der 1. BImSchV einhalten zu können. Verschiedene weitere Parameter, wie z. B. das Ascheschmelzverhalten oder die Gehalte an chemischen Elementen (z. B. Stickstoff, Chlor, Natrium und Kalium), spielen vor allem für die Charakterisierung schlechterer Qualitäten eine Rolle. Diese zusätzlichen Parameter werden in der Regel gemäß DIN EN ISO 17225-4 in entsprechend ausgestatteten Laboren untersucht. Die Häufigkeit der Untersuchungen richtet sich nach Art, Menge und Verwendung der eingesetzten Holzhackschnitzel.

Da ein direkter Zusammenhang zwischen den Brenn- und Emissionseigenschaften der Holzhackschnitzel und den Parametern Wassergehalt, Partikelgrößenverteilung und Aschegehalt besteht, wird im Folgenden der Einfluss der Parameter kurz erläutert:

Wassergehalt

Je trockener Holzhackschnitzel sind, desto vollständiger erfolgt der Abbrand und umso heißer sind die Verbrennungstemperaturen im Feuerraum. Dies hat zur Folge, dass relativ geringe Emissionen von Kohlenstoffmonoxid (CO) und Staub (v. a. unverbrannter Ruß) zu erwarten sind. Außerdem ist der Heizwert direkt vom Wassergehalt abhängig, d. h. bei sinkendem Wassergehalt steigt die Energieausbeute. Allerdings sollte der anlagenbedingte Mindestwassergehalt für den optimalen Betrieb nicht unterschritten werden, da es bei zu niedrigem Wassergehalt auch zu einer unvollständigen Verbrennung aufgrund zu heißer Temperaturen in der Feuerung und dadurch zu einem zu schnellen, ungleichmäßigen Abbrand kommen kann. Außerdem kann sich die Effizienz der Anlage dadurch verschlechtern, dass durch einen zu niedrigen Wassergehalt die Wärmeübertragung beeinträchtigt wird.

Partikelgrößenverteilung

Mit einem steigenden Feinanteil können erhöhte Staubemissionen auftreten. Dies ist zum einen mit dem erhöhten Anteil an mineralischem Material im Feinanteil zu erklären. Der Feinanteil beeinflusst zudem die Ausformung des Glutbetts und damit die

Abbrandqualität. Dabei besteht die Möglichkeit, dass im Kessel kleine, teils unverbrannte Partikel durch die Verbrennung oder den Abgasstrom mitgerissen werden. Wie stark der Einfluss des Feinanteils auf die Staubemissionen ist, hängt somit auch von der Konstruktion des Kessels und der Verbrennungsführung ab. Neben dem Feinanteil kann auch ein hoher Grobanteil mit sehr langen und sperrigen Partikeln negativ für den Anlagenbetrieb sein. Dieser führt beispielsweise zu Blockaden in den Förderagregaten, zur Bildung von Brennstoffbrücken im Bunker und zu einer ungleichmäßigen Ausformung des Glutbetts.

Aschegehalt

Da reines Stammholz i. d. R. einen Aschegehalt von deutlich unter 1 m-% aufweist, sind hohe Anteile an Nadeln und/oder Rindenstücken oder auch mineralische Verunreinigungen wie Bodenmaterial maßgeblich für einen hohen Aschegehalt verantwortlich. Diese Bestandteile finden sich zu großen Teilen im Feinanteil, sodass diese Fraktion ausschlaggebend für den Gesamt-Aschegehalt der Holzhackschnitzel ist. Aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung wirken sich diese Bestandteile negativ auf die Verbrennung aus und können u. a. zu erhöhten Staubemissionen führen.

Die aufgeführten Parameter sind bereits vor und während der Hackschnitzelproduktion, aber auch bei einer anschließenden Aufbereitung oder bei der Brennstofflagerung beeinflussbar. Im Folgenden werden einzelne Schritte der Qualitätssicherung dargestellt. Dazu wurde die komplette Prozesskette angelehnt an die Norm DIN EN 15234-4 in die Abschnitte Rohstoffbereitstellung, Herstellung der Holzhackschnitzel sowie Auslieferung der Brennstoffe aufgeteilt (siehe Abbildung 9.1 und Kapitel 6).



Abbildung 9.2: Prozessbeschreibung zur Bereitstellung von Rohstoffen (angelehnt an DIN EN 15234-4)

Die jeweiligen kritischen Kontrollpunkte und qualitätsbeeinflussenden Maßnahmen und Prüfmethode sind in den zugehörigen Tabellen erläutert. Für die Bereitstellung von Holzhackschnitzeln mit Aufbereitung durch Siebung und Trocknung sind die meisten Prozessschritte identisch mit der Bereitstellung ohne Aufbereitung. Die zusätzlichen Prozessschritte, die sich aus der Aufbereitung ergeben, sind mit einer gelborangen Einfärbung im Schema gekennzeichnet. Das hier abgebildete Schema bietet einen möglichst vollständigen Überblick über alle relevanten Prozesskettenglieder, wobei der Ablauf in einzelnen Schritten

individuell von diesem Schema abweichen kann. Die angegebenen Maßnahmen zur Qualitätsverbesserung sind dann sinngemäß auf die vorliegende Prozesskette zu übertragen.

Das erste Schema (siehe Abbildung 9.2) zeigt einzelne Schritte der Bereitstellung von Holz für die spätere Weiterverarbeitung zu Holzhackschnitzeln. Neben der Beschreibung des Bereitstellungsprozesses werden kritische Kontrollpunkte aufgeführt, die Einfluss auf die Hackschnitzelqualität haben. In der zugehörigen Tabelle 9.1 wird vereinfacht gezeigt, welcher genannte Schritt der Bereitstellung auf welche der genannten Brennstoffeigenschaften Einfluss nimmt.

Bereits durch die Herkunft und den Ursprung sind gewisse Eigenschaften des Rohmaterials vorgegeben. So unterscheidet sich beispielsweise das Stammholz einer hiebreifen Fichte aus dem Wald von dem Erntematerial einer 4-jährigen Kurzumtriebsplantage u.a. in den Brennstoffeigenschaften Aschegehalt und Wassergehalt. Auch die eingesetzte Erntemethode beeinflusst bereits die Qualität des späteren Produktes. So besteht beispielsweise bei der Ernte durch neuere Holzvollernter die Möglichkeit, den Rindenanteil des Einzelstammes mithilfe eines Fall- und Entbindungskopfes zu minimieren. Dies trägt zur Reduzierung des Aschegehalts im späteren Produkt bei und sorgt gleichzeitig für den Verbleib der Nährstoffe auf der Fläche.

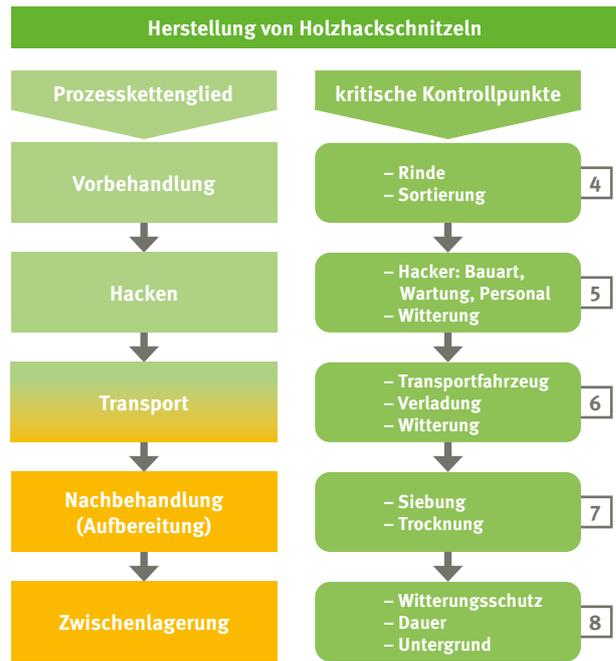


Abbildung 9.3: Prozessbeschreibung zur Herstellung von Holzhackschnitzeln (angelehnt an DIN EN 15234-4)

Tabelle 9.1: Kontrollpunkte und Einfluss auf die Holzhackschnitzelqualität (Teil 1)

Prozess-kettenglied	Kritische Kontrollpunkte	Einfluss auf die Holzhackschnitzelqualität
1 Biomasse	Holzart	<ul style="list-style-type: none"> • Strauchartige Biomasse, die feiner gegliedert ist als Stammholz und einen höheren Anteil an Rinde und Blättern/Nadeln hat, besitzt dadurch einen erhöhten Aschegehalt. • Im Vergleich zu Nadelhölzern führt die Verwendung von Laubholz möglicherweise zu erhöhten Staubemissionen.
	Kompartiment der Biomasse	<ul style="list-style-type: none"> • Die feingegliederte Biomasse von Baumkronen weist höhere Anteile an Rinde und Blättern/Nadeln auf und dadurch einen erhöhten Aschegehalt. • Die Verwendung von weitgehend astfreiem und rindenarmem Stammholz reduziert den Aschegehalt.
2 Ernte	Untergrund	<ul style="list-style-type: none"> • Ein nasser Untergrund in Verbindung mit einem bindigen Boden kann zu mineralischen Anhaftungen am Holz führen (Verunreinigungen). • Ein gefrorener, bindiger Boden verringert die Anhaftungen.
	Witterung	<ul style="list-style-type: none"> • Feuchte Witterung kann die Bindungsfähigkeit des Bodens erhöhen, was zu Anhaftungen am Holz und somit zu einem erhöhten mineralischen Anteil in den späteren Holzhackschnitzeln führen kann. • Wird Holz, dass bei Niederschlag geerntet wurde, vor dem Hacken getrocknet, verhindert das eine Erhöhung des Wassergehaltes.
	Erntetechnik	<ul style="list-style-type: none"> • Bei der motormanuellen Ernte kann durch weitgehendes Entasten die Hackschnitzelqualität verbessert werden (Verringerung von überlangen Stücken durch Quereinzug im Hacker). • Durch den Einsatz eines Harvesters mit integrierter Entastungsfunktion kann die Rinde des Vollholzes durch ein scharf eingestelltes Werkzeug (Astungsmesser) teilweise direkt vor Ort entfernt und so der mineralische Anteil der Biomasse verringert werden.
3 Lagerung (Holz)	Untergrund	<ul style="list-style-type: none"> • Ein möglichst fester Untergrund verringert die Gefahr von mineralischen Anhaftungen. • Falls kein befestigter Untergrund zur Verfügung steht, kann alternativ Holz zum Aufbocken des Polters verwendet werden, welches nicht weiterverwendet wird und am Lagerort verbleibt. Bei Waldrestholz wird hierfür die unterste Lage im Wald gelassen. • Bei der Lagerung auf Schotter kann eine feste Unterlage ebenfalls vor Anhaftungen am Holz schützen.
	Dauer	<ul style="list-style-type: none"> • Mit der Dauer der Lagerung sinkt bei ausreichender Temperatur und Durchlüftung der Wassergehalt durch natürliche Trocknung. • Durch Niederschlag können Verunreinigungen abgewaschen werden. • Eine Lagerungsdauer über eine Vegetationsperiode hinaus kann zu verstärkter biologischer Zersetzung und zu hohen Verlusten und Qualitätseinbußen führen. • Hinsichtlich des Waldschutzes ist darauf zu achten, dass die Lagerung nur so lange dauert, dass eine Besiedelung bzw. der Wiederausflug von forstlichen Schadinsekten nicht begünstigt wird.

Nach der Ernte und Bearbeitung des Holzes schließt, je nach Kompartiment des geernteten Gehölzes, der Prozessschritt Holzurückung an. Sofern das geerntete Stammholz im Wald gerückt wird, kann es hierbei zu Verunreinigungen durch Anhaftungen von Bodensubstrat und damit zur Erhöhung des Aschegehalts kommen. Beim Einschlag besteht auch die Möglichkeit, Kronenmaterial gebündelt (im Polter) abzulegen, um es vor Ort zu trocknen und es anschließend energetisch nutzen zu können. Durch die Abtrocknung kommt es zu einem Verlust an Nadeln und Reisig und damit zu einem gewissen Substanzverlust, der aber auch mit einer Verringerung des Aschegehaltes einhergeht. Auf der anderen Seite besteht hier die Gefahr der Verschmutzung des Materials. Generell ist beim späteren Verladen von Stammholz, Kronenmaterial oder anderen Baumkompartimenten darauf zu achten, dass die Verunreinigung möglichst minimal gehalten wird. Verschmutztes Material sollte ggf. im Wald verbleiben. Die Dauer der Lagerung sollte auf den für die angestrebte Trocknung notwendigen Zeitraum begrenzt werden, um unnötige Substanzverluste durch Zersetzungsprozesse zu vermeiden.

Während des Transports des ungehackten Ausgangsmaterials ist der Einfluss auf die Brennstoffqualität als gering einzustufen. Falls anschließend eine Lagerung erfolgt, bestehen weitere Möglichkeiten, auf die Hackschnitzelqualität einzuwirken, in Abhängigkeit von Art und Dauer der Lagerung (siehe Tabelle 9.1).

Das zweite Schema (siehe Abbildung 9.3) stellt den Ablauf der Holzhackschnitzelherstellung in einzelnen Prozessabschnitten dar. Dieser Teil der Hackschnitzelherstellung schließt an die Bereitstellung der Rohstoffe an und umfasst mehrere Abschnitte, die in jedem Produktionsprozess Anwendung finden. Die entsprechenden kritischen Kontrollpunkte und der Einfluss auf die Qualität der Holzhackschnitzel sind für den Abschnitt der Herstellung in Tabelle 9.2 dargestellt. Die nur in Bereitstellungsketten mit Aufarbeitung anfallenden Prozessschritte sind in den Abbildungen und Tabellen gelborange hinterlegt.

Sofern nötig, beginnt die Holzhackschnitzelherstellung mit einer Vorbehandlung des eingesetzten Rohstoffes. Dies könnte beispielsweise eine Entrindung oder Sortierung sein, was zur Minimierung des Aschegehaltes führt. Anschließend erfolgt der tatsächliche Produktionsprozess der Holzhackschnitzel – das

Hacken (siehe auch Kapitel 6). Den größten Einfluss auf die produzierten Brennstoffe hat neben dem Rohmaterial die eingesetzte Maschinenteknik, also der Hacker. Bereits die Bauart der Maschine beeinflusst die Qualität der Holzhackschnitzel. So erzeugen Schnecken-, Scheibenrad- und Trommelhacker allein aufgrund ihrer technischen Ausführung unterschiedliche Brennstoffe. Dies betrifft vor allem die Verteilung der Partikelgrößen der Holzhackschnitzel. In der Praxis werden am häufigsten Trommelhacker verwendet. Dies gaben die Teilnehmer einer entsprechenden Studie in Bayern an [9-1]. Daneben werden auch Scheibenrad- und Schneckenhacker eingesetzt [9-2].

Neben dem Hackertyp beeinflussen die gewählte Maschineneinstellung (Messerschärfe, Siebkorb etc.) und der Zustand der eingesetzten Maschinenteknik die Brennstoffqualität (Kapitel 6). Sofern beispielsweise die Messer des eingesetzten Hackers scharf sind oder regelmäßig gewartet und nachgeschärft werden, lassen sich grundsätzlich relativ homogene Holzhackschnitzel produzieren. Stumpfe Messer produzieren dagegen zerklebertes Schredderholz. Ist das eingesetzte Ausgangsmaterial verunreinigt, werden die Messer des Hackers schneller stumpf und die Hackschnitzelqualität nimmt ab. Der Verschleiß der Messer hängt dabei auch von der eingestellten Schnittlänge ab. Je feiner gehackt wird, desto schneller verschleifen die Messer.

Im Anschluss an die Herstellung der Holzhackschnitzel können sich weitere Schritte zur Aufbereitung der Brennstoffe anschließen (siehe auch Kapitel 7). Falls es als notwendig erachtet wird, können z.B. eine Siebung zur Abtrennung unerwünschter Partikelgrößen und/oder eine Trocknung erfolgen.

Die Siebung erfolgt meist in Trommel-, Schwing- oder Sternsieben und trennt i.d.R. den Feinanteil, häufig aber auch den Grobanteil ab. Hierdurch erhöht sich die Homogenität der Brennstoffe. Eine Partikelgrößenverteilung nach DIN EN ISO 17225-4 kann mit einer hohen Wahrscheinlichkeit eingehalten werden (vgl. Kapitel 7). Die Änderung der Partikelgröße beeinflusst zudem die Luftzirkulation und damit die Selbsterwärmung bei der Lagerung von Holzhackschnitzeln in Haufwerken. Beide Prozesse (Luftzirkulation, Selbsterwärmung) sind für die natürliche Trocknung der Brennstoffe zwingend erforderlich (siehe Kapitel 6).

Tabelle 9.2: Kontrollpunkte und Einfluss auf die Holzhackschnitzelqualität (Teil 2)

Prozess-kettenglied	Kritische Kontrollpunkte	Einfluss auf die Holzhackschnitzelqualität
4 Vorbehandlung	Rinde	<ul style="list-style-type: none"> Die Rinde kann durch den Einsatz einer Entrindungsmaschine, eines Fäll- und Entrindungskopfes am Harvester oder manuell entfernt werden.
	Sortierung	<ul style="list-style-type: none"> Erfolgt durch den Hackerfahrer. Wenn hierbei stark verschmutztes Holz aussortiert wird, sinkt der mineralische Anteil und so der Aschegehalt. Eine gezielte Sortierung kann für die Produktion unterschiedlicher Holzhackschnitzelqualitäten genutzt werden.
5 Hacken	Hackerbauart	<ul style="list-style-type: none"> Für kleinere Stammdurchmesser können Schneckenhacker durch ihre Bauform oft bessere Holzhackschnitzelqualitäten liefern als Trommel- oder Scheibenradhacker (bezüglich Überlängen), da diese dazu neigen, Reststücke mit in den Brennstoff zu ziehen. Der Einzugswalzendurchmesser ist für die Holzhackschnitzelqualität ebenfalls entscheidend: Walzen mit kleinerem Durchmesser können für einen gradlinigeren Einzug des Materials sorgen und liefern dadurch bessere Holzhackschnitzelqualitäten. Der Austrag der Holzhackschnitzel mittels Förderband oder auch mit einem Gebläse mit vermindertem Druck kann eine Nachzerkleinerung verringern und damit auch den Feinanteil.

Tabelle. 9.2: Kontrollpunkte und Einfluss auf die Hackschnitzelqualität (Teil 2) FORTSETZUNG

Prozess-kettenglied	Kritische Kontrollpunkte	Einfluss auf die Holzhackschnitzelqualität
5 Hacken	Maschinen-einstellungen/ Hackerwartung	<ul style="list-style-type: none"> Nur scharfe Hackermesser gewährleisten die Erzeugung glattkantiger Holzhackschnitzel, wofür regelmäßiges Schärfen oder Auswechseln der Messer erforderlich ist. Mineralische Verunreinigungen an dem zu hackenden Holz können die Standzeiten der Messer deutlich verkürzen. Weitere Maschineneinstellungen (Schnittweite, Prallsiebe etc.) sollten entsprechend der gewünschten Partikelgröße der Holzhackschnitzel gewählt werden. Zudem sollte die richtige Einzugs geschwindigkeit im Verhältnis zur Drehzahl des Schneidaggregats eingestellt werden, um die gewünschten Partikelgrößen zu erhalten. Die Intervalle für die Hackerwartung sollten eingehalten und je nach Bedingungen beim Hacken evtl. gekürzt werden.
	Hackerpersonal	<ul style="list-style-type: none"> Das Hackerpersonal ist so zu schulen, dass möglichst nur reines Holz ohne Anhaftungen für die Holzhackschnitzelproduktion genutzt wird. Beim Befüllen des Hackers ist auf einen konstanten und geraden Einzug des Rohmaterials bis zum jeweiligen Ende des Holzstückes zu achten. Überfüllen des Hackers kann zu einem Rückstau der Holzhackschnitzel und damit zu einer Nachzerkleinerung durch wiederholtes Hacken führen.
	Witterung	<ul style="list-style-type: none"> Wird bei Niederschlag gehackt, kann der Wassergehalt der Holzhackschnitzel ansteigen. Wird anhaftendes Wasser (auch in Form von Eis oder Schnee) beim Hacken mitverarbeitet und im Rohmaterial verteilt, steigt dadurch der Wassergehalt der Holzhackschnitzel.
6 Transport	Transport-fahrzeug	<ul style="list-style-type: none"> Beim Transport der Holzhackschnitzel ist darauf zu achten, dass das Transportbehältnis sauber und frei von Störstoffen ist. Das kann zum einen die Erhöhung des mineralischen Anteils im Brennstoff verhindern und sorgt zum anderen für weniger Störungen im Heizbetrieb. Ein sauberes Transportbehältnis (Anhänger oder Container) ist am ehesten gewährleistet, wenn es ausschließlich für den Holzhackschnitzeltransport eingesetzt wird. Falls das nicht möglich ist, muss nach einem Wechsel das Transportbehältnis gründlich kontrolliert und evtl. gereinigt werden.
	Verladung (im Wald)	<ul style="list-style-type: none"> Die Verladung sollte nach Möglichkeit direkt durch den Hacker erfolgen (Abbunkern in das Transportbehältnis). Ist eine Zwischenlagerung der Holzhackschnitzel im Wald notwendig, siehe Punkt 8. Beim Verladen mit einem Radlader nach einer Zwischenlagerung im Wald ist darauf zu achten, dass nur unverschmutzte Holzhackschnitzel und keine Bodenpartikel und Steine in den Brennstoff gelangen.
	Verladung (beim Aufbereiter)	<ul style="list-style-type: none"> Nach einer Zwischenlagerung werden die Holzhackschnitzel durch die Umlagerung beim Verladen und Abladen homogenisiert, z. B. können dadurch unterschiedliche Wassergehalte zwischen Haufwerksinnerem und äußeren Schichten ausgeglichen werden. Dabei ist jedoch darauf zu achten, dass die Holzhackschnitzel nicht undurchmischt verladen werden (z. B. nur die oberste Schicht eines Haufwerks). Beim Verladen mit einem Radlader nach einer Zwischenlagerung ist darauf zu achten, dass nur unverschmutzte Holzhackschnitzel und keine Bodenpartikel und Steine in den Brennstoff gelangen.
	Witterung	<ul style="list-style-type: none"> Beim Transport der Holzhackschnitzel ist das Transportbehältnis (Anhänger oder Container) bei schlechter Witterung abzudecken, sodass die Holzhackschnitzel nicht nass werden und die Hackschnitzelqualität nicht verschlechtert wird.
7 Aufbereitung	Siebung	<ul style="list-style-type: none"> Ein Ziel der Siebung ist die Verringerung des Feinanteils und des damit verbundenen mineralischen Anteils und der Nadeln. Dabei ist die Maschenweite so zu wählen, dass der Feinanteil und die mineralischen Anteile abgeseibt werden, aber möglichst wenig aus der Hauptfraktion entfernt wird. Ein weiteres Ziel ist das Absieben der Überlängen, die eine Hauptursache für Störungen in der Brennstoffzufuhr von Heizungsanlagen darstellen. Das Fließverhalten verbessert sich ebenfalls durch die Konfektionierung. Ob die gewünschten Qualitätsanforderungen nach dem Sieben erreicht wurden oder ob überhaupt eine Siebung notwendig ist, kann mit der in Kapitel 10 vorgestellten vereinfachten Methode ermittelt werden.
	Trocknung	<ul style="list-style-type: none"> Da der Wassergehalt maßgebend für die Verbrennungseigenschaften und damit das Emissionsverhalten der Holzhackschnitzel ist, sollte dieser möglichst im optimalen Bereich für die jeweilige Feuerungsanlage liegen. Durch (vorwiegend technische) Trocknung kann der Wassergehalt verringert werden. Die Qualitätskontrolle kann nach dem in Kapitel 10 dargestellten vereinfachten Verfahren zur Wassergehaltsbestimmung erfolgen und sollte vor und nach dem Trocknungsvorgang durchgeführt werden.
8 Zwischen-lagerung	Untergrund	<ul style="list-style-type: none"> Ein fester, sauberer Untergrund verringert die Gefahr von Verunreinigungen durch Störstoffe wie Steine o. ä., erhält so die Hackschnitzelqualität und beugt Störungen im Heizbetrieb vor.
	Witterungs-schutz	<ul style="list-style-type: none"> Eine Abdeckung des Haufwerks mit einem diffusionsoffenen Vlies oder die Lagerung in einer Halle verhindert die Befeuchtung durch Niederschlag, ermöglicht so häufig einen schnelleren Trocknungsvorgang. Findet die Lagerung nach einer Trocknung statt, ist ein witterungsgeschützter Lagerplatz sehr zu empfehlen. Zudem kann es bei niedrigen Außentemperaturen zur Bildung einer Kondensationsschicht kommen.
	Dauer	<ul style="list-style-type: none"> Bei längerer Lagerungsdauer begünstigt erhöhte Feuchtigkeit und ein hoher Grünanteil (Laub und Nadeln) Abbauprozesse (Verrottung) und erhöht unter ungünstigen Umständen die Gefahr der Selbstentzündung. Verrottete Anteile sollten im Anschluss abgeseibt werden, ggf. nach einem erneuten Trocknungsschritt, da das Absieben von trockenem Feinmaterial deutlich besser funktioniert als das von feuchtem Material. Da sich die Qualität während der Lagerung hinsichtlich des Wassergehaltes ändern kann, sollte dieser von Zeit zu Zeit kontrolliert werden. Dafür kann auch die in Kapitel 10 vorgestellte vereinfachte Methode verwendet werden.

Tabelle 9.3: Kontrollpunkte und Einfluss auf die Holzhackschnitzelqualität (Teil 3)

Prozesskettenglied	Kritische Kontrollpunkte	Einfluss auf die Holzhackschnitzelqualität
9 Lagerung beim Endverbraucher	Witterungsschutz	• Um eine gleichbleibende Holzhackschnitzelqualität während der Heizperiode zu garantieren, sollte ein Witterungsschutz an dieser Stelle obligatorisch sein.
	Dauer	• Bei Holzhackschnitzeln mit mittlerem oder höherem Wassergehalt sollte die Lagerungsdauer möglichst kurz gehalten werden, siehe Punkt 8.
	Lagerort	• Die Lagerstätte sollte möglichst so ausgeführt sein, dass eine Verunreinigung während der Lagerung und bei der Befüllen der Heizanlage vermieden wird.

Durch Abtrennen des Feianteils, vor allem des Grünanteils wie Nadeln und Blätter, durch eine Siebung verringert sich die Gefahr einer übermäßigen Selbsterwärmung (vgl. Kapitel 6). Gleichzeitig ist hiernach eine bessere Luftzirkulation in der Schüttung bzw. dem Haufwerk gegeben, da das Porenvolumen zunimmt. Inwieweit es durch eine vorangegangene Siebung jedoch tatsächlich zu einer besseren und verlustfreieren Brennstofftrocknung kommt, ist nicht abschließend geklärt.

Wenn eine Trocknung erfolgen soll, ist abzuwägen, welche Art der Trocknung wirtschaftlich und unter praktischen Aspekten am sinnvollsten umsetzbar ist (Kapitel 7). Für die Reduktion des Wassergehaltes in Holzhackschnitzeln bestehen zwei grundsätzliche Möglichkeiten:

- technische Trocknung mit Wärmezufuhr
- natürliche Trocknung

Eine technische Trocknung hat den Vorteil, dass sie relativ schnell abgeschlossen sein kann, sodass im Optimalfall ein lagerstabiler Holzhackschnitzel nach verhältnismäßig kurzer Zeit erzeugt wird. Allerdings bedarf es hier entsprechender Ausstattung, beispielsweise einer Containertrocknung o.Ä., und eines wirtschaftlich und ökologisch sinnvollen Wärmekonzeptes, z. B. Nutzung der Abwärme einer Biogasanlage.

Die natürliche Trocknung bei der Lagerung der Brennstoffe in Haufwerken stellt von den Investitions- und Betriebskosten eine relativ günstige Alternative zur technischen Trocknung dar, die allerdings viel Platz benötigt. Diese natürliche Trocknung ist im Vergleich zur technischen Trocknung mit höheren Risiken verbunden. Bei der Zwischenlagerung frischer Holzhackschnitzel vor und nach dem Aufbereiten können folgenden Risiken auftreten (vergleiche auch Kapitel 6):

- Substanzverlust durch biologische Prozesse (Verlustrisiko)
- Selbstentzündungs- und Brandrisiko (Gefährdungsrisiko)
- Pilzwachstum und Pilzsporenbildung (Gesundheitsrisiko)
- Geruchsbelästigung (Umweltrisiko)
- Wiederbefeuchtung bzw. Umverteilung des Wassergehaltes (Qualitätsrisiko)

Ausführliche Darstellungen zur Lagerung von Holzhackschnitzeln liefern auch Hartmann [9-4] und Bosch et al. [9-3].

Das dritte Schema (siehe Abbildung 9.4) stellt mit der Auslieferung (falls zutreffend) und der Hackschnitzellagerung beim Endkunden die letzten Schritte der Hackschnitzelbereitstellung dar. Ein erneuter Transport der Holzhackschnitzel ist nur nach einer Aufbereitung und damit Zwischenlagerung notwendig. Die kritischen Kontrollpunkte dieses Prozesskettengliedes sind



Abbildung 9.4: Prozessbeschreibung zur Auslieferung von Holzhackschnitzeln (angelehnt an DIN EN 15234-4)

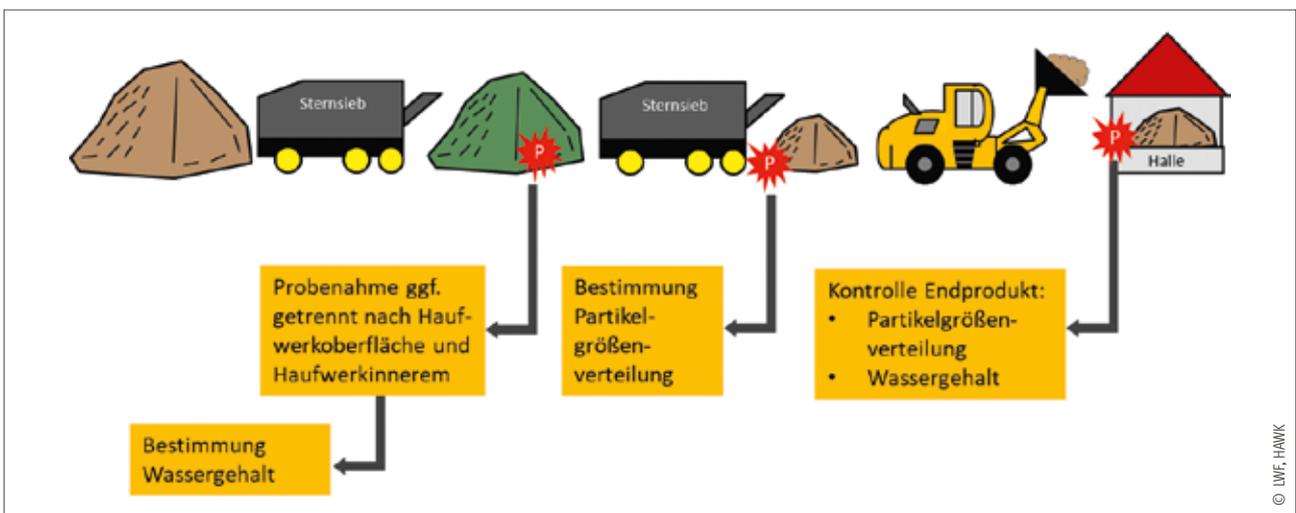


Abbildung 9.5: Probenahmepunkte (P) bei der Aufbereitung (Beispiel)

identisch mit denen bei der Herstellung der Brennstoffe. Bei der Lagerung der Holzhackschnitzel beim Endkunden treten dieselben Risiken auf wie bei der Zwischenlagerung, falls es sich hierbei um frische und nicht um getrocknete Brennstoffe handelt (s. o). Die wichtigsten Punkte, die beim Transport beachtet werden sollten, sind die Sauberkeit des Transportbehältnisses und die Verladung von homogenisierten Holzhackschnitzeln. Ein witterungsgeschützter Transport kann ebenfalls qualitätsbeeinflussend sein, d. h. Abdeckung wird empfohlen. Zudem sollte darauf geachtet werden, dass die Lagerung nicht länger als ein Jahr dauert, und Verunreinigungen und Feuchtigkeit vermieden werden. Die Lagerung in einer Halle oder unter einem Vlies kann die Wiederbefeuchtung der Brennstoffe durch Niederschlag vermeiden. Weitere Anhaltspunkte zur richtigen Lagerung von Holzhackschnitzeln liefern Bosch et al. [9-4]. Die kritischen Kontrollpunkte und der Einfluss auf die Hackschnitzelqualität sind in den entsprechenden Tabellen dargestellt (siehe Tabelle 9.2 und 9.3).

9.2 Kontrollpunkte und Qualitätssicherungsmaßnahmen

Maßnahmen zur Qualitätssicherung an den entsprechenden Kontrollpunkten erfolgen unabhängig vom Bereitstellungsverfahren. Analog zu den Prozesskettenbeschreibungen mit kritischen Kontrollpunkten sind bei den Qualitätssicherungsmaßnahmen die Teile, die nur für die Aufbereitung relevant sind, im Schema gelborange hinterlegt. Die restlichen Maßnahmen an einzelnen Prozessschritten gelten für Prozessketten sowohl mit als auch ohne Aufbereitungsschritte wie Sieben und Trocknen mit Fremdenergiezufuhr.

In Tabelle 9.4 werden die wichtigsten Kontrollpunkte in Verbindung mit den entsprechenden Qualitätssicherungsmaßnahmen aufgeführt. Die mit einbezogenen vereinfachten Bestimmungsmethoden können die Standardmethoden nach Norm nicht ersetzen, sind aber eine sinnvolle und vor Ort einsetzbare Ergänzung.

Tabelle 9.4: Kontrollpunkte und Maßnahmen zur Qualitätssicherung in der Hackschnitzelherstellung

Prozessabschnitt/ Teilprozess	Maßnahme zur Qualitätsoptimierung	Einfluss auf die Qualität durch:	Qualitätssicherungsmaßnahme
Ernte des Rohstoffs	geeignete Baumartenauswahl bzw. Holzsortimente	Minimierung von Aschegehalt, Wassergehalt und Grünanteil, Erhöhung der Lagerstabilität als Folge	Prüfung vor und während der Ernte
Ernteprozess	Auswahl eines geeigneten Ernteverfahrens	Minimierung des Aschegehalts durch geringeren Rindenanteil, Grünanteil und Reduzierung der Verschmutzungsgefahr (Störstoffe)	Anleitung des Personals zur Reduzierung des Rindenanteils oder Grünanteils im Zuge der Ernte (wenn vorhanden, entsprechende Einstellung des Fäll- und Entrindungskopfes am Harvester, weitgehende Aufastung bei motormanueller Ernte, Reduzierung des Nadel-/Blattanteils bei Wiederaufnahme von Astmaterial nach Lagerung)
Lagerung (Holz)	Poltern oder Ablegen auf möglichst sauberem Untergrund, Lagerungsdauer nicht länger als eine Vegetationsperiode oder entsprechend forsthygienischer Vorgaben	Abtrocknung, Minimierung des Aschegehalts durch geringeren Rindenanteil, Grünanteil und Reduzierung der Verschmutzungsgefahr (Störstoffe)	Auswahl eines geeigneten Lagerplatzes, visuelle Prüfung auf Verunreinigungen und Zustand des Holzes nach Lagerung
Produktion/ Hacken	Auswahl geeigneter Technik, kontinuierliche Wartung, Einsatz geeigneten Personals, Personalschulung	Anpassung der Partikelgrößen, glattkantige Partikelform, Lagerstabilität	Siebung zur Kontrolle der Partikelgrößenverteilung in Anlehnung an DIN EN ISO 17827-1, genaue Betrachtung des Feinanteils (siehe Kapitel 10)
Transport	Auswahl geeigneter, sauberer Technik, kontinuierliche Überprüfung der Sauberkeit, Personalschulung	Reduzierung der Verschmutzungsgefahr (Störstoffe)	Sicherstellen, dass nur saubere Transportbehältnisse eingesetzt werden
technische oder natürliche Trocknung	Auswahl eines wirtschaftlich vertretbaren Verfahrens, natürliche Trocknung mit oder ohne Abdeckung, ggf. unter Dach, je nach Verfügbarkeit von Lagerfläche	Reduktion des Wassergehalts, Erhöhung der Lagerstabilität, Verringerung von möglichem Substanzverlust	vereinfachte Wassergehaltsbestimmung in Anlehnung an DIN EN ISO 18134-2 (siehe Kapitel 10)
Siebung	Absiebung von Feinanteil und Überlängen	Minimierung von Staubemissionen, Beeinflussung des Fließverhaltens	vereinfachte Siebung zur Kontrolle der Partikelgrößenverteilung in Anlehnung an DIN EN ISO 17827-1 (siehe Kapitel 10)
Lagerung (HHS)	Lagerung auf möglichst sauberem Untergrund, trocken lagern (d. h. unter Dach oder abgedeckt)	Verhindern von Wiederbefeuchtung durch Niederschlag und Reduzierung der Verschmutzungsgefahr (Störstoffe)	vereinfachte Wassergehaltsbestimmung in Anlehnung an DIN EN ISO 18134-2 (siehe Kapitel 9) Vereinfachte Siebung zur Kontrolle der Partikelgrößenverteilung in Anlehnung an DIN EN ISO 17827-1 (siehe Kapitel 10)

Die beschriebenen Maßnahmen zur Qualitätssicherung, besonders bei der Hackschnitzelbereitstellung mit Aufbereitung, sind maßgebliche Voraussetzung für die Produktion qualitativ hochwertiger Holzhackschnitzel. Die Probenahme und Untersuchung der relevanten Parameter an den kritischen Punkten des Prozesses sind dabei entscheidend für die Erfolgskontrolle. Für ein Beispiel einer Hackschnitzelaufbereitung sind die wichtigsten drei Probenahmepunkte für eine optimale Qualitätssicherung in Abbildung 9.5 dargestellt. Je nach individuellem Prozessablauf der Aufbereitung können andere Kontrollpunkte für die Probenahme sinnvoll sein. Im dargestellten Beispiel sollte die erste Probenahme während bzw. nach der Trocknung erfolgen. Durch Ermittlung des Wassergehaltes der Holzhackschnitzel können so Rückschlüsse auf den Trocknungsfortschritt gezogen und der Aufbereitungsprozess angepasst werden, d.h. in diesem Fall möglicherweise eine Änderung der Trocknungsdauer. Der zweite sinnvolle Probenahmezeitpunkt ist im Anschluss an die abschließende Siebung. Mit der Analyse der Partikelgrößenzusammensetzung wird zum einen kontrolliert, ob die Verringerung des Feinanteils den Erfordernissen entspricht, und zum anderen, ob das Entfernen von Überlängen erfolgreich war. Der letzte Kontrollpunkt für eine Probenahme und Qualitätsbestimmung ist das Ende der Lagerung des aufbereiteten Produktes. Durch die Kontrolle des Endproduktes hinsichtlich Wassergehalt und Partikelgrößenzusammensetzung erfolgt der entscheidende Schritt der Qualitätssicherung des Produktes. Mit den entsprechenden Analysen und der Dokumentation der Ergebnisse kann die erzielte Qualität gegenüber dem Kunden nachgewiesen werden. Bei Abweichungen von der gewünschten Qualität ermöglicht diese Kontrolle entsprechende Korrekturen, wie z.B. eine Nachtrocknung, um Reklamationen und Unzufriedenheit von Kunden zu vermeiden. Die zu untersuchenden Parameter an den Kontrollpunkten können im Rahmen einer Selbstkontrolle entweder nach den geltenden Normen oder mit den in Kapitel 10 beschriebenen vereinfachten Verfahren bestimmt werden. Bei der Probenahme kann nach der Norm DIN EN ISO 21945 vorgefahren werden oder nach dem in Kapitel 10 beschriebenen vereinfachten Verfahren, das eng an die genannte Norm angelehnt ist.

9.3 Ergänzende Maßnahmen zur Qualitätsverbesserung

Neben den qualitätssichernden Maßnahmen während des Aufbereitungsprozesses haben auch die anderen Anteile der Prozesskette zur Hackschnitzelbereitstellung Einfluss auf die Qualität der Holzhackschnitzel. Die entsprechenden kritischen Kontrollpunkte der einzelnen Prozesskettenglieder können bei Beachtung zur Prozessoptimierung und damit zur Qualitätssicherung bzw. Qualitätsverbesserung beitragen. Die zugehörigen Tabellen für die jeweiligen Prozessketten geben Auskunft über die zu beachtenden Parameter (siehe Tabelle 9.2, 9.3 und 9.4). Ergänzende Maßnahmen zur Qualitätsverbesserung und damit zur Emissionsminderung beim Heizen können vom Kunden durchgeführt werden. Dieser kann z. B. durch die Überprüfung der Hackschnitzelqualität mit den in Kapitel 10 beschriebenen Methoden zukünftig qualitätsorientierter einkaufen und so die angebotene Hackschnitzelqualität allgemein verbessern.

Eine weitere Möglichkeit zur Qualitätsverbesserung stellt die Dokumentation im Sinne eines Qualitätsmanagements dar. Diese ist sehr hilfreich, um Fehlerursachen zu finden, z. B. wenn Hackmesser in Verbindung mit bestimmten (verschmutzten) Holzsortimenten auffällig oft verschleifen. Zudem ist der Nachweis der Produktqualität immer dann vorteilhaft, wenn es zu Konflikten mit Kunden oder Lieferanten bzw. Zwischenhändlern kommt.

10 VEREINFACHTE METHODEN ZUR SELBSTÜBERWACHUNG DER HOLZHACKSCHNITZEL-QUALITÄT

Der Einsatz von Holzhackschnitzeln als Brennstoff bei landwirtschaftlichen und anderweitig Biomasse verarbeitenden Betrieben ist aufgrund der natürlichen Gegebenheiten für eine kostengünstige und nachhaltige Wärmeversorgung des Betriebes einschließlich der privaten Liegenschaften naheliegend. Vor allem bei Selbstversorgern und bei nebenberuflichen Hackschnitzelherstellern ist eine Qualitätssicherung durch Einbeziehung externer Analysen bei der Bereitstellung der Holzhackschnitzel aufgrund der meist geringen Mengen und individuell sehr unterschiedlichen Bereitstellungsketten schwer umzusetzen. Des Weiteren ist es auch für Hersteller und Händler mit technischer Aufbereitung interessant, interne Qualitätskontrollen selbst durchzuführen. Die im folgenden Kapitel vorgestellten vereinfachten Methoden zur Qualitätssicherung geben eine Anleitung zur Kontrolle der kritischen Parameter in Hinblick auf eine Qualitätsverbesserung der Holzhackschnitzel sowie die Optimierung und Überprüfung der Bereitstellungsketten.



Holzhackschnitzelprobe zur Bestimmung des Wassergehaltes

10.1 Vereinfachte Methoden der Selbstüberwachung

Um die Eigenschaften des Brennstoffes Holzhackschnitzel festzustellen, sind Prüfungen entsprechend der Methodik nach DIN EN ISO 17225 Teil 4, ggf. auch nach Teil 1 bzw. 9 erforderlich, die in der Regel in einem entsprechend ausgestatteten Labor erfolgen. Dieses Vorgehen ist jedoch mit relativ hohem Kosten- und Zeitaufwand verbunden. Es gibt verschiedene Gründe, die dafürsprechen, häufiger Analysen der Hackschnitzelqualität vorzunehmen, als dies nach der Methodik nach Norm möglich ist:

- Ein Selbstversorger produziert nur Mengen für den Eigenbedarf und benötigt die Angaben zur Qualität für optimale Steuerung des Kessels und für einen störungsfreien Betrieb.
- Ein Händler will die Hackschnitzelqualität im Zeitraum zwischen zwei externen Analysen untersuchen, um gleichbleibende Qualität liefern zu können.
- Kesselbetreiber müssen im Rahmen der wiederkehrenden Überwachung alle zwei Jahre dem Schornsteinfeger gegenüber die erforderliche Brennstoffqualität nachweisen.

Vor diesem Hintergrund wurden vereinfachte Verfahren entwickelt, mit denen die wichtigsten Parameter in Anlehnung an die geltenden Normen analysiert werden können:

- Partikelgrößenverteilung
- Wassergehalt

Diese Verfahren dienen der Selbstkontrolle und ersetzen die Analysen nach DIN EN ISO 17225-4 nicht. Für den Parameter Aschegehalt konnte kein vereinfachtes Verfahren entwickelt werden, da für die Bestimmung ein spezieller Glühofen zur Veraschung der Probe bei 550°C und eine Feinwaage benötigt werden. Diese spezielle Laborausstattung sowie die notwendige fachkundige Durchführung erlauben es nicht, diese Analysen außerhalb eines entsprechenden Labors durchzuführen.

Die in diesem Handbuch beschriebenen vereinfachten Methoden zur Bestimmung des Wassergehaltes und der Partikelgrößenverteilung können mithilfe einer detaillierten und allgemein verständlichen Anleitung und eines entsprechenden Excel-Auswertblattes vorgenommen werden. Die Anleitung mit einem Formblatt zum Eintragen der Messergebnisse (siehe Abbildung 10.1) und das Excel-Auswertblatt zum Herunterladen

sind zu finden unter:
mediathek.fnr.de/broschuren/bioenergie/feste-biobrennstoffe/handbuch-zum-qualitatsmanagement-von-holzhackschnitzeln.html

Qualitätskontrolle von Holzhackschnitzeln
 Vereinfachte Analysen angelehnt an DIN EN ISO 17225-4

HAWK

Probenbezeichnung: _____ Bearbeiter: _____
 Datum: _____

Manuelle Siebung angelehnt an DIN EN ISO 17827-1
 Vorgesehene Partikelgrößen-Klasse: _____

Sieb (mm)	Sieb, leer (g)	Massen der Einzelbestimmungen	
		Teilprobe 1 (g)	Teilprobe 2 (g)
Gesamtprobe			
Aufgangschale			
Sieb 3,15 mm			
Sieb _____ mm			
> 100 mm (Handsortierung)			
Übergrößen (Handsortierung)			
Längstes Stück (mm)			

i) Lochgröße des Siebes gemäß vorgesehener Partikelgrößenklasse eintragen

Wassergehalt (Backofenmethode) angelehnt an DIN EN 18314-2

Wagung	Backblech		
	leer (g)	mit frischer Probe (g)	mit trockener Probe (g)

Bemerkungen: _____

Abbildung 10.1: Formblatt zur Auswertung der vereinfachten Verfahren

10.2 Probenahmen angelehnt an die DIN EN ISO 21945

Durch die Probenahme soll eine Holzhackschnitzelprobe gewonnen werden, die repräsentativ für die gesamte Charge (Haufwerk, Lager etc.) ist. Zu diesem Zweck wird eine bestimmte Anzahl von Einzelproben von verschiedenen Stellen einer Charge genommen und zu einer Gesamtprobe vereinigt. Nach dem Mischen werden daraus Anteile für die Bestimmung von Wassergehalt und Partikelgrößenverteilung entnommen.

Da es sich bei Holzhackschnitzeln um einen sehr inhomogenen Brennstoff handelt, ist die Probenahme mit großer Sorgfalt durchzuführen. Wichtige Voraussetzung für eine repräsentative Probe ist eine optisch relativ einheitliche Charge, z.B. ohne erkennbar unterschiedliche Zonen mit und ohne Grünanteil oder durch Regen durchnässte Holzhackschnitzel an der Oberfläche eines Haufwerkes. Bei größeren Unterschieden und inhomogenen Chargen sollten je Bereich getrennt Proben entnommen und untersucht werden oder die Charge wird vor der Probenahme durch Umlagerung und Durchmischung homogenisiert.

Von einer augenscheinlich einheitlichen Charge wird sowohl für die Entnahme aus dem fallenden Strom als auch für die Pro-

benahme aus dem Haufwerk eine bestimmte Anzahl von Einzelproben genommen. Die Mindestanzahl der Einzelproben hängt von der Größe der Charge ab. Ihr Mindestvolumen hängt von der Partikelgröße ab (siehe Tabelle 10.1 und 10.2).

Tabelle 10.1: Anzahl der Einzelproben

Chargengröße	Probenanzahl
$m \leq 30 \text{ t}$	10 (5)
$30 \text{ t} < m \leq 100 \text{ t}$	15 (10)

* Anzahl in Klammern gelten für Probenahme aus fallendem Strom

Tabelle 10.2: Volumen der Einzelproben

Partikelgrößenklasse	Probenvolumen
P16/P16s	2 l
P31/P31s	2 l
P45/P45s	3 l

Für die Durchführung der Probenahme sind alle notwendigen Aspekte des Arbeitsschutzes zu beachten, z. B. das Einhalten eines entsprechenden Sicherheitsabstandes bei der Probenahme während des Abkippens vom Lkw.

Sofern die Möglichkeit besteht, Proben aus dem fallenden Strom, z. B. beim Abladen von einem Lkw oder dem Abwurf von einem Förderband, zu entnehmen, ist diese Möglichkeit zu bevorzugen. Die Probenahme sollte am besten mit einem geeigneten Probensammler erfolgen (siehe Abbildung 10.2). Steht dieser nicht zur Verfügung, kann auch ein entsprechend großer Eimer zur Entnahme der Probe aus dem fallenden Strom verwendet werden. Zur Entnahme einer repräsentativen Probenmenge werden von dem fallenden Material in regelmäßigen Zeitabständen volumengleiche Einzelproben genommen (Anzahl/Volumen der Einzelproben: siehe Tabelle 10.1 und 10.2).

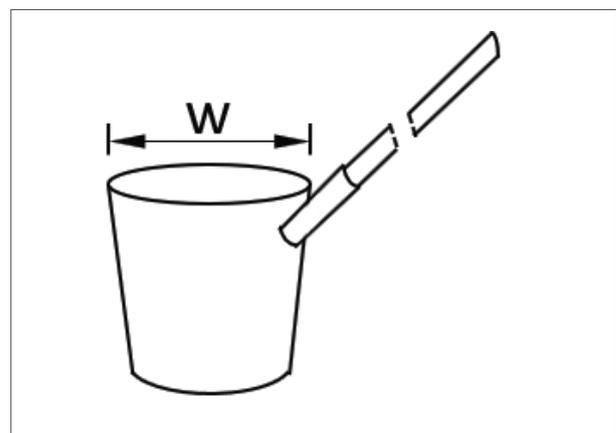


Abbildung 10.2: Muster für einen Probensammler zur Probenahme aus fallendem Strom (Breite [W] mind. 2,5-Fache der Partikelgröße der Hauptfraktion) (entnommen aus [10-1])

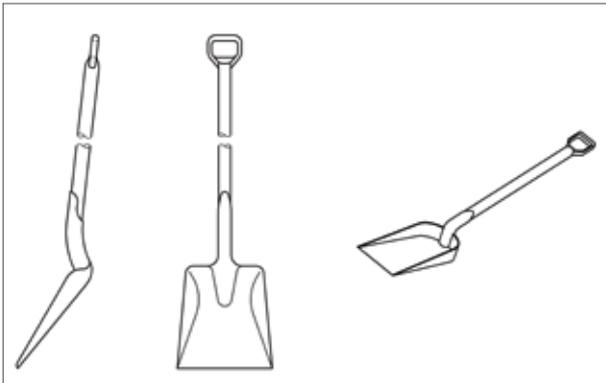


Abbildung 10.3: Muster für Schaufel zur Probenahme von Haufwerken (Breite mind. 2,5-Fache der Partikelgröße der Hauptfraktion) (entnommen aus [10-1])

Steht die Möglichkeit nicht zur Verfügung, die Probe aus dem fallenden Strom zu nehmen, muss die Probenahme vom Haufwerk erfolgen. Dazu wird eine entsprechend breite Schaufel benötigt (siehe Abbildung 10.3).

Bei der Beprobung eines Haufwerks sind Einzelproben von allen Teilen des Haufwerks zu entnehmen, die anschließend zu einer Mischprobe vereint werden. Dabei sollten idealerweise alle Bereiche einschließlich des Haufwerksinneren berücksichtigt werden. Eine beispielhafte Verteilung der Probenahmepunkte für eine repräsentative Beprobung gibt Abbildung 10.4 wieder.

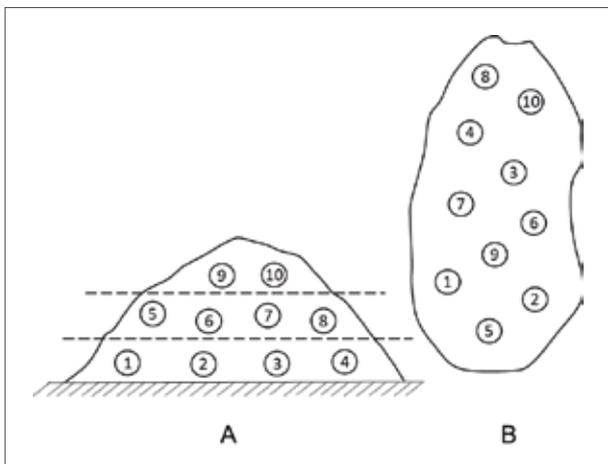


Abbildung 10.4: Probenahmepunkte an einem Haufwerk; Seitenansicht (A), von oben (B)

Wichtig ist auch, keine Verunreinigungen vom Boden in die Probe zu bekommen. Um an die unteren Probenahmepunkte zu gelangen, ist meist der Einsatz eines Radladers oder ähnlicher Hilfsmittel erforderlich. Die maximale Größe eines Haufwerks, das als eine Partie betrachtet werden darf, umfasst ca. 100t. Größere Haufwerke sind in Teilpartien zu unterteilen und getrennt zu untersuchen.

Um eine homogene Mischprobe herzustellen und das Probenvolumen auf die gewünschte Menge zu verringern, werden die Einzelproben auf einer glatten, sauberen und trockenen Fläche zu einem Kegel aufgeschüttet. Dazu wird jede neue Schaufelladung so auf die vorhergehende aufgebracht, dass die

Holz hackschnitzel gleichmäßig nach allen Seiten herabrieseln. Dieser Vorgang ist durch Umschaufeln zu einem neuen Kegel zu wiederholen. Die Spitze des Kegels wird abgeflacht und der Kegel geviertelt, wobei zwei gegenüberliegende Viertel verworfen und die beiden anderen Viertel unter erneutem Vermischen zu einem neuen Kegel angehäuft werden (siehe Abbildung 10.5). Bei Bedarf wird der Vorgang wiederholt, bis die restliche Probe die gewünschte Menge aufweist (4l für die Partikelgrößenverteilung, 1–2l für die Wassergehaltsbestimmung). Um eine Veränderung des Wassergehaltes bei der Probenahme zu vermeiden sind folgende Regeln zu beachten:

- zügiges Arbeiten
- Zwischenlagerung der Einzelproben bis zur Probenreduktion geschützt vor Regen oder Austrocknung, z. B. durch Lagerung in abgedeckten Eimern

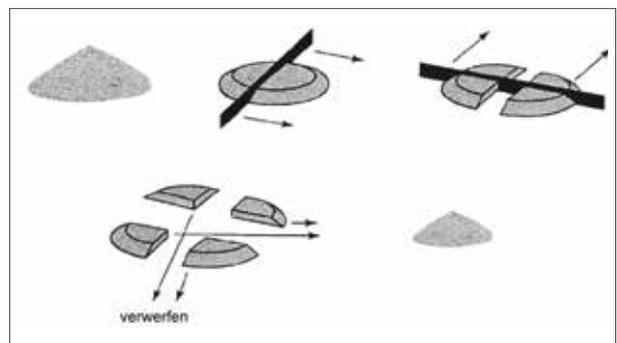


Abbildung 10.5: Schritte zur Verringerung des Probenvolumens (entnommen aus [10-2])

10.3 Bestimmung des Wassergehalts

Die Bestimmung des Wassergehaltes kann nach DIN EN ISO 18134-2 erfolgen. Falls die dafür erforderlichen Mittel nicht zur Verfügung stehen, kann für eine Abschätzung des Wassergehaltes der Holz hackschnitzel die im Folgenden vorgestellte Methode (Backofenmethode), angelehnt an die Norm, verwendet werden. Für die Bestimmung nach dem vereinfachten Verfahren werden folgende Materialien benötigt:

- Backofen mit Umluft-Funktion, bevorzugt in Standardbreite 60 cm für guten Luftaustausch
- Backblech, geeignet für den Umluftbetrieb
- Min-/Max-Thermometer (Temperaturverträglichkeit und Skala bis mindestens 120 °C)
- Waage (ablesbar auf 0,1 g; Kapazität: mindestens 2 kg)
- Formblatt und Excel-Auswertebrett
- Probe: ca. 300 g Holz hackschnitzel

Für die vereinfachte Wassergehaltsbestimmung werden ca. 300 g Holz hackschnitzel verwendet, die unmittelbar nach der Probenahme (siehe Kapitel 10.2) verwendet oder bis zur Bestimmung des Wassergehaltes luftdicht verpackt werden, um ein Abtrocknen der Probe zu verhindern. Bevor die eigentliche Trocknung im Ofen stattfinden kann, muss zunächst die richtige Temperatureinstellung für den jeweiligen Ofen gefunden werden, da diese stark von dem eingestellten Wert abweichen kann.

Dazu wird die Ofentemperatur auf 105 °C eingestellt und mit der Umluft-Funktion auf die vorgesehene Temperatur aufgeheizt.

Ist die eingestellte Solltemperatur erreicht, wird ein Min-/Max-Thermometer in den Ofen gelegt. Nach ca. 30 Minuten sollte anhand des Thermometers überprüft werden, ob die Temperatur immer unter 120 °C geblieben ist und ob die mittlere Temperatur bei etwa 105 °C lag. Bei Bedarf muss das Verfahren mit geänderter Temperatureinstellung des Ofens wiederholt werden, bis die gemessenen Temperaturen den Solltemperaturen entsprechen. Sind danach die individuellen Einstellungen für den Backofen bekannt, kann der Wassergehalt nach der vereinfachten Methode bestimmt werden. Dazu wird nach folgenden Schritten vorgegangen:

1. Das leere, trockene und kalte Backblech auf die Waage legen und die Masse im Formblatt notieren.
2. Ca. 300 g Holzhackschnitzel auf das Backblech schütten, gleichmäßig ausbreiten und sofort wiegen. Die Masse vom Backblech mit der frischen Probe ablesen und im Formblatt notieren.
3. Das Backblech in den kalten Ofen stellen, Ofen auf Umluftbetrieb einschalten, Temperaturregler auf erprobte Temperatur einstellen und ca. 24 Stunden heizen. Bei sehr frischem/feuchtem Holz in Abständen mehrmals die Ofentür öffnen, damit der Wasserdampf entweichen kann (Vorsicht, heißer Dampf!).
4. Nach 24 Stunden das Backblech herausnehmen, 15 Minuten abkühlen lassen und wieder wiegen. Die Masse vom Backblech mit der trockenen Probe ablesen und im Formblatt notieren.
5. Die Eintragungen vom Formblatt in das Excel-Auswertebrett übertragen. Der Wassergehalt und die zugehörige Wassergehaltsklasse werden automatisch berechnet.

Für die Analyse des Wassergehaltes sind folgende Sicherheitshinweise zu beachten:

- Die Zulässigkeit des unbeaufsichtigten Betriebs des verwendeten Ofens ist bei dessen Hersteller zu erfragen. Für Schäden, z. B. durch Fehlfunktionen, kann von den Verfassern dieser Anleitung keine Haftung übernommen werden.
- Sicherstellen, dass die Temperatur nie über 120 °C steigt!
- Für Hackschnitzel mit sichtbarem Laub- oder Nadelanteil zunächst bei ca. 60 °C trocknen, sonst besteht Brandgefahr. Trocknung nach mehreren Stunden bei 105 °C fortsetzen.

10.4 Bestimmung der Partikelgrößenverteilung und des Feinanteils

Für die vereinfachte Bestimmung der Partikelgrößenverteilung wird eine Siebung per Hand durchgeführt. Dieses manuelle Siebverfahren erfasst die wichtigsten Kriterien zur Klassifikation von Holzhackschnitzeln. Um den Aufwand der manuellen Siebung in vertretbaren Grenzen zu halten, wird neben Feinanteil und Übergrößen nur der Hauptanteil entsprechend der erwarteten Klasse ermittelt, nicht wie bei der Siebung nach DIN EN ISO 17827-1 alle Größenklassen. Bei Bedarf muss daher eine zweite Siebung mit dem entsprechend geänderten Sieb für die Hauptfraktion erfolgen. Durch die kürzere Siebdauer (4 min) und die geringere Rüttelbewegung im Vergleich zum Verfahren nach Norm können geringfügige Minderbefunde beim Feinanteil und der Hauptfraktion auftreten (siehe Kapitel 10.5).

Für die Partikelgrößenverteilung und die Bestimmung der Partikelgrößenklasse, angelehnt an die Norm, werden die folgenden Materialien benötigt:

- 2-l-Messbecher
- Waage (Ablesbarkeit: 0,1 g, Kapazität: mind. 2 kg)
- 2 Analysensiebe (Rundlochsiebe, \varnothing : 300 mm; Loch- \varnothing 3,15 mm und Loch- \varnothing der Hauptfraktion, z. B. 16 mm für P16/P16s)
- Auffangschale für die Fraktion $< 3,15$ mm
- Stoppuhr
- Lineal
- Formblatt und Excel-Auswertebrett
- Probe: 4 l Holzhackschnitzel (für Proben mit langen dünnen Partikeln: 10 l)

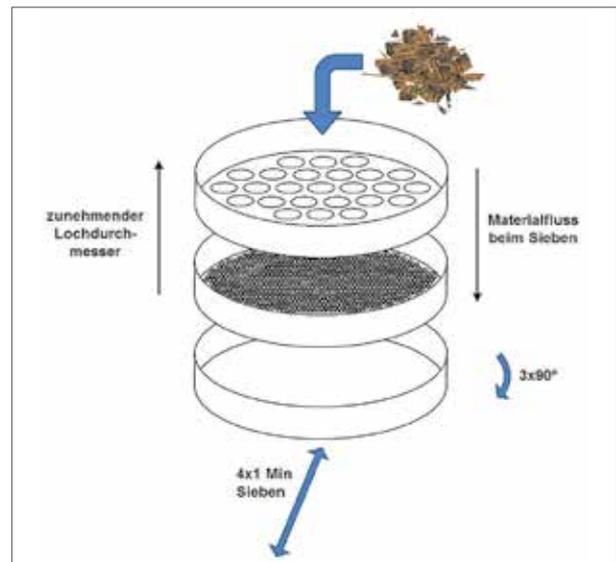


Abbildung 10.6: Vereinfachtes Sieben (angelehnt an DIN EN ISO 17827-1)

4 l Probe werden in einem größeren Gefäß (z. B. Backblech) ausgebreitet und an einem gut gelüfteten Ort zum Trocknen für 1 bis 3 Tage (je nach Wassergehalt) stehen gelassen. In der Regel ist die Probe ausreichend abgetrocknet, sobald sich die Holzhackschnitzel trocken anfühlen oder wenn sich die Masse der Probe bei zweimaligem Wiegen im Abstand von einer Stunde um höchstens 5 g unterscheidet. Die Vortrocknung dient dazu, dass keine kleinen Partikel an anderen haften bleiben und dass kein nennenswerter Masseverlust durch Abtrocknen während der Siebung auftritt. Für die anschließende vereinfachte Einteilung



Abbildung 10.7: Beispiel für die Bestimmung der Länge eines Hackschnitzels. Sobald der Querschnitt des Partikels 0,5 cm² überschreitet, ist die gesamte Partikellänge zu berücksichtigen. (Länge des Beispiel-Hackschnitzels: 81 mm)

der Holzhackschnitzel in Partikelgrößenklassen führt man die folgenden Arbeitsschritte durch:

1. Auffangschale, 3,15-mm-Sieb und das Sieb für die Hauptfraktion übereinander stecken und auf eine glatte Arbeitsfläche stellen.
2. Für den ersten Durchgang 2 l Probe in einen Messbecher füllen, die Probe wiegen (Tara des Messbechers abziehen) und dann auf das obere Sieb schütten.
3. Die Siebe mit der Probe 4-mal je eine Minute durch Hin- und Herschieben sieben. Nach jedem Intervall das Sieb um ein Viertel drehen, damit sich die Bewegungsrichtung der Partikel ändert (siehe Abbildung 10.6).
4. Das obere Sieb vom Stapel herunternehmen und in beiden Sieben nach folgenden Teilen suchen und wie beschrieben verfahren:
 - a. **alle Teile über einer Länge von 100 mm:** Alle Teile > 100 mm aus der Sammelschale und vom Sieb der Hauptfraktion sammeln, Zugehörigkeit mit dem Lineal prüfen (siehe Abbildung 7); Teile gesammelt wiegen und als Fraktion „> 100 mm“ im Formblatt eintragen.
 - b. **längstes Teil:** Nur Teile vom Sieb für die Hauptfraktion und aus der Fraktion > 100 mm berücksichtigen; größte Länge messen und im Formblatt eintragen. Wenn es kürzer als 100 mm ist, vor dem Wiegen in das Sieb zurücklegen, aus dem es entnommen wurde.
5. Auffangschale und beide Siebe mit der jeweiligen Fraktion wiegen und die Massen im Formblatt eintragen.
6. Den Siebvorgang mit der zweiten 2-l-Probe wiederholen.
7. **Nur für Proben mit dünnen, überlangen Teilen (ersetzt Schritt 4b):** Aus einer Probe von 10l die drei längsten Teile aussortieren. Von diesen drei Teilen können maximal zwei

Teile mit einem Querschnitt von höchstens 0,5 cm² (entspricht einem Durchmesser von ca. 8 mm) aussortiert und verworfen werden. Die Länge des längsten verbliebenen Teils ist als größte Länge zu notieren. Alle Teile in die Probe zurücklegen, mischen und das Probenvolumen auf 4 l für die Vortrocknung und anschließende Siebung (Schritt 1–6) reduzieren (siehe auch Ablaufschema in Abbildung 10.8).

Alle Massen sowie die größte Länge sind vom Formblatt in das Excel-Auswertblatt zu übertragen. Ebenfalls ist die Bezeichnung der Probe, die Sollgröße der Hauptfraktion (entspricht dem Sieb mit der größeren Lochgröße!), der Name des Prüfers, das Datum der Prüfung und bei Bedarf Bemerkungen einzutragen. Die Anteile der Partikelgrößenfraktionen und die Klassifikation (angelehnt an DIN EN ISO 17225-4) werden automatisch im Auswertblatt berechnet. Die detaillierten Klassifikationskriterien für die manuelle Siebanalyse sowie die Unterschiede zur Klassifikation nach DIN EN ISO 17225-4 finden sich im Excel-Auswertblatt. Zur Siebung nach der vereinfachten Methode steht außerdem ein Anleitungs-Film zur Verfügung, der unter video.hawk-hhg.de (Suchwort: Holzhackschnitzel) oder mittels QR-Code abgerufen werden kann. Die Vorgaben für die maximalen und minimalen Anteile der jeweiligen Partikelgrößenfraktionen sowie die Maximalgrößen der Holzhackschnitzel für die zu bestimmenden Partikelgrößenklassen sind in DIN EN ISO 17225-4 (siehe Tabelle 5.3) angegeben.

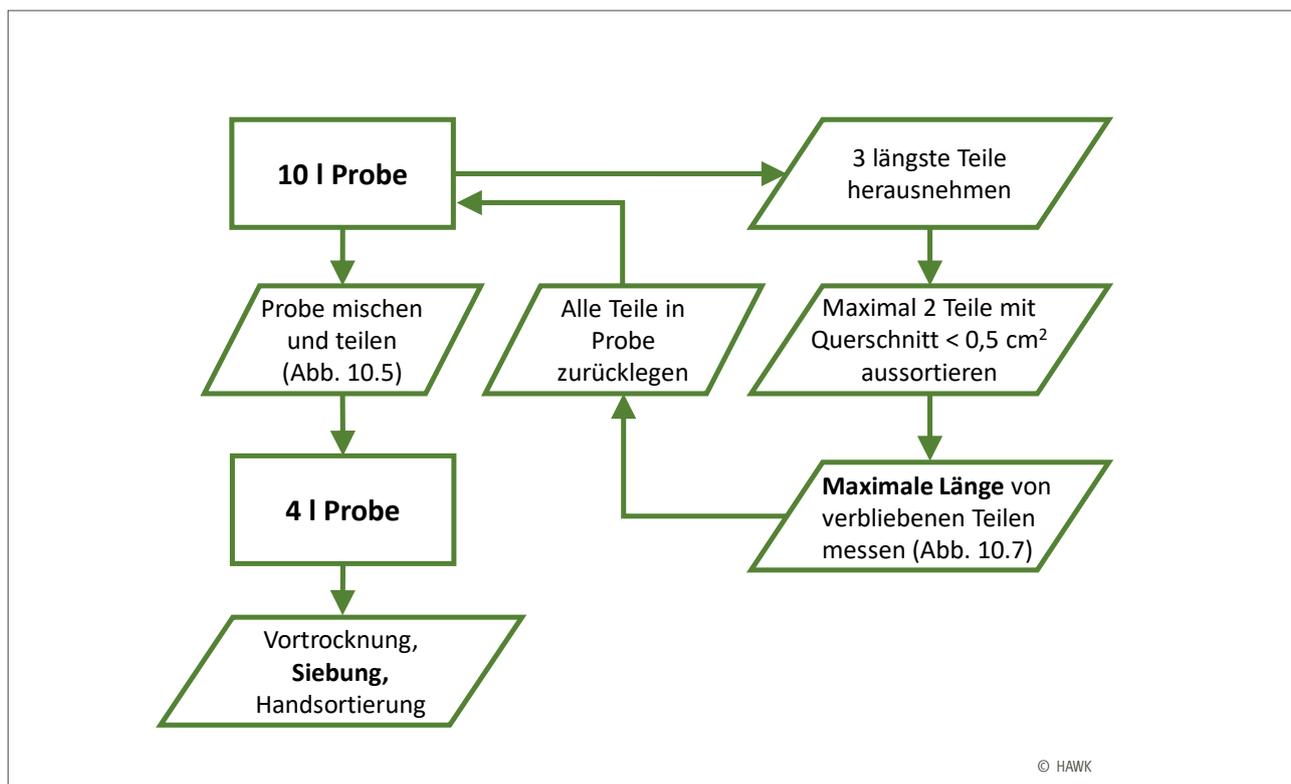


Abbildung 10.8: Ablaufschema von Siebung für Proben mit überlangen dünnen Teilen (Querschnitt < 0,5 cm²)

10.5 Validierung der Methoden (Vergleich mit Analysen und Normen)

Hinter der Entwicklung der vereinfachten Methoden stand die Intention, die Überprüfung der einflussnehmenden Parameter während des Bereitstellungsprozesses zu erleichtern und damit die Qualität der Holzhackschnitzel zu verbessern. Der Vergleich der Ergebnisse, die mithilfe der vereinfachten Verfahren bzw. mit Analysen nach DIN EN ISO 18134-2 (Bestimmung des Wassergehaltes) und DIN EN ISO 17827-1 (Bestimmung der Partikelgrößenverteilung) gewonnen wurden, zeigte, dass unter Einhaltung der Arbeitsanweisungen die in Tabelle 10.3 angegebenen maximalen Abweichungen eingehalten werden können. Dafür wurden Holzhackschnitzel-Sortimente der Größenklassen P16s bis P45s und mit Wassergehalten zwischen 5 und 50 m-% untersucht.

Tabelle 10.3: Ermittelte maximale Abweichungen der vereinfachten Methoden von denen nach Norm

Parameter Klasse	Partikelgrößenverteil. (relative Abweichung) %		Parameter Klasse	Wassergehalt (absolute Abweichung) m-%
	Feinanteil	Hauptfraktion		
P16s manuell	15	3	M 10	1
P31s manuell	15	2	M15–M30	3
P45s manuell	15	2	≥ M35	3,5

Zur Validierung der vereinfachten Wassergehaltsbestimmung wurde zum einen die Temperaturkonstanz des verwendeten Ofens während des Trocknungsvorganges überprüft und zum anderen wurden Wassergehalte nach vereinfachtem Verfahren und nach Norm bestimmt und miteinander verglichen. Die Temperaturschwankungen während der Heizperiode lagen bei dem untersuchten Ofen mit Umluft-Funktion in der Versuchszeit zwischen 104 °C und 113 °C, im Mittel wurde eine Temperatur über 105 °C und unter 120 °C erzielt (siehe Abbildung 10.9). Die Temperaturstabilität sollte vor Anwendung der vereinfachten Methode für jeden individuell eingesetzten Backofen bestimmt werden, damit bei der vereinfachten Methode korrekte Ergebnisse bestimmt werden.

Zum Vergleich der Backofenmethode mit der Methode nach Norm wurden 14 Proben mit Wassergehalten zwischen 5 m-% und 51 m-% jeweils in Doppelbestimmungen untersucht. Die ermittelten Wassergehalte lagen bei beiden Methoden auf einem sehr ähnlichen Niveau mit einer mittleren Abweichung von 0,1 m-% bezogen auf alle 14 untersuchten Proben. Auch die Schwankungen der Doppelbestimmungen waren bei beiden Methoden relativ ähnlich. Auf der Grundlage der vorliegenden Ergebnisse kann die vereinfachte Wassergehaltsbestimmung als gut geeignet eingestuft werden, um die Abschätzung des Wassergehaltes vorzunehmen (siehe Abbildung 10.10).

Im Rahmen des Projektes „qualiS“ wurden kürzere Trocknungszeiten als die hier verwendeten 24 Stunden nicht untersucht. Insbesondere für Holzhackschnitzel mit niedrigen Wassergehalten ist denkbar, dass damit ebenfalls Ergebnisse mit ausreichender Übereinstimmung in Bezug auf die Analyse nach DIN EN ISO 18134-2 erreichbar sind. Wenn die Methode mit verkürzten Zeiten eingesetzt werden soll, sollte der Wasserge-

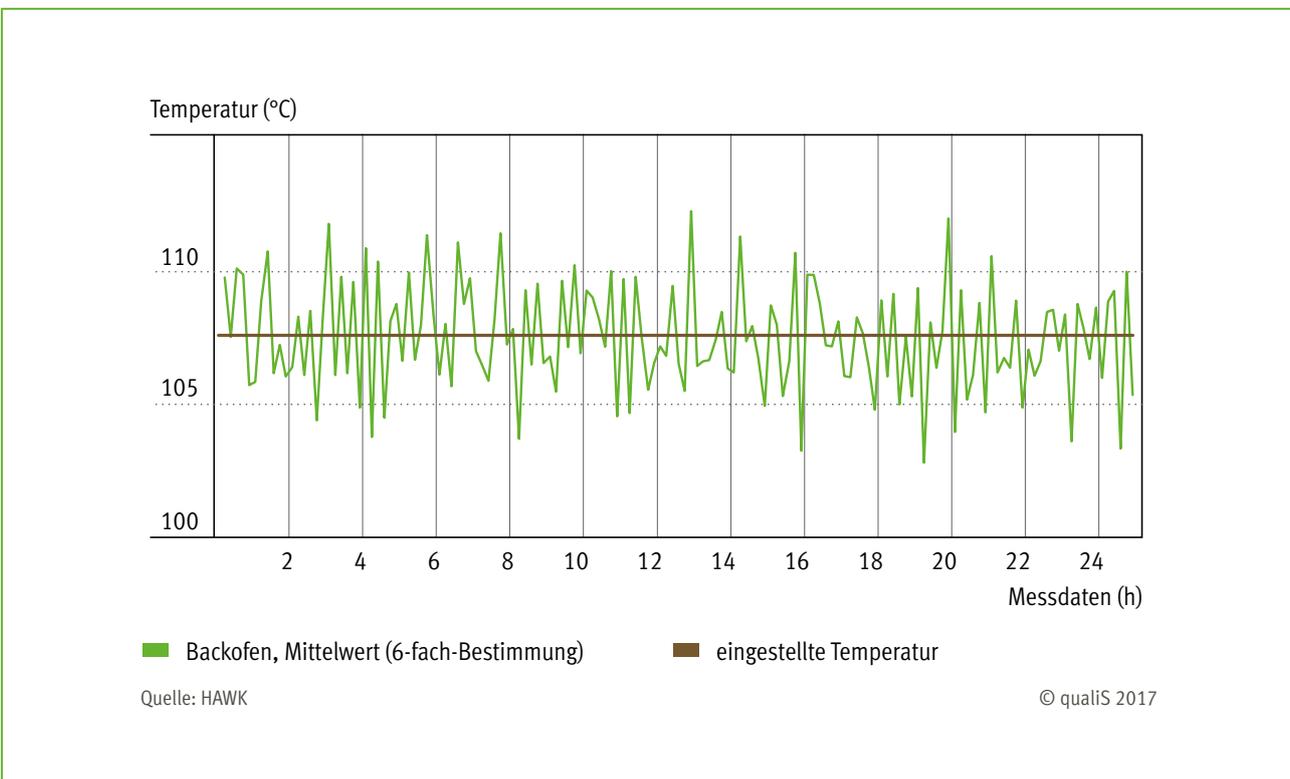


Abbildung 10.9: Hysterese der Temperatur des verwendeten Ofens über 24 Betriebsstunden

halt mit der zu untersuchenden Brennstoffart bei der angestrebten Trocknungsdauer bestimmt werden. Anschließend muss dieselbe Probe eine weitere Stunde getrocknet und ausgewogen werden, um sicherzustellen, dass keine nennenswerte Abweichung mehr auftritt (max. zusätzlich 0,2% Massenverlust).

Bei der Siebung nach dem vereinfachten Verfahren können nicht alle Kriterien nach Norm abgedeckt werden, da in Bezug auf die Übergrößen keine Auftrennung in alle nach Norm erforderlichen Fraktionen erfolgt (siehe Tabelle 5.3). Zudem wird durch die manuelle Siebung des vereinfachten Verfahrens tendenziell eine geringere Menge Feinanteil abgetrennt als durch die automatisierte Siebung gemäß Norm (siehe Abbildung 10.13). Das hat zur Folge, dass der Feinanteil mit der vereinfachten Methode als etwas zu gering eingestuft wird. Mit diesem Hintergrundwissen ist jedoch eine relativ genaue Abschätzung der Hackschnitzelqualität möglich.

In Abbildung 10.11 sind für den Feinanteil und die Hauptfraktion dargestellt, wie groß die Differenz abhängig von der Dauer der Siebung gegenüber dem Sollwert ist. Als Sollwert wurde der Wert nach vollständiger Siebung gemäß der Norm gesetzt. Insbesondere beim Feinanteil treten innerhalb der ersten 3 Minuten der Siebung deutliche Veränderungen auf, nach der 4. Minute sind aber nur noch relativ kleine Veränderungen

zu registrieren. Auf dieser Grundlage wurde die Dauer für die Siebung des vereinfachten Verfahrens auf 4 Minuten festgelegt.

Die Robustheit der Methode wurde ebenfalls überprüft. Dazu wurde eine Hackschnitzelprobe von fünf verschiedenen Personen gesiebt, um subjektive Einflussfaktoren zu überprüfen (siehe Abbildung 10.12). Es zeigte sich, dass der Einfluss der Personen auf das Ergebnis vernachlässigbar ist.

Zum Vergleich der vereinfachten Methode mit der Siebung nach Norm wurden P16- bzw. P45-Holzhackschnitzel in Mehrfachbestimmungen nach beiden Methoden untersucht. Die Schwankungsbreiten waren bei beiden Methoden sehr ähnlich (siehe Abbildung 10.13). Die vereinfachte Methode ist also z. B. dazu geeignet, die Qualitätsverbesserung durch Aufbereitungsmaßnahmen nachzuweisen.

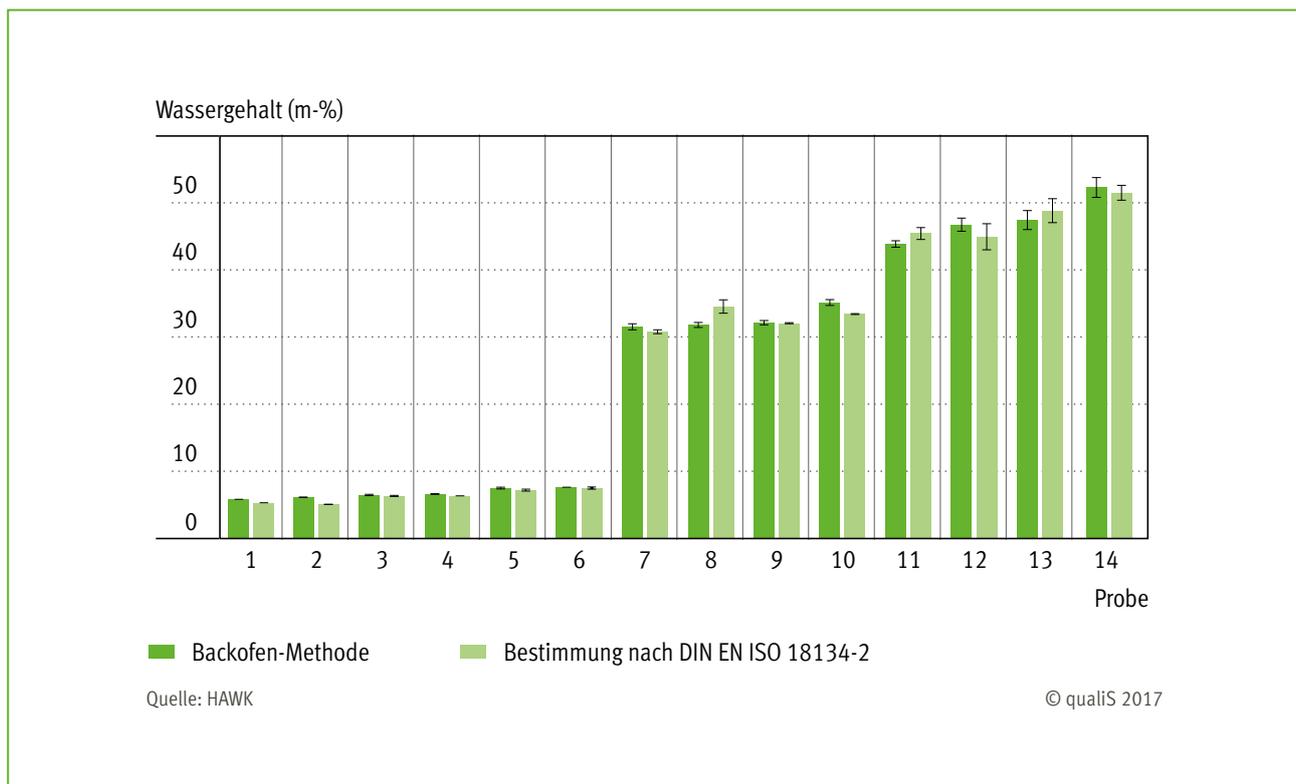


Abbildung 10.10: Vergleich von 14 Wassergehaltsbestimmungen nach DIN EN ISO 18134-2 (jeweils Doppelbestimmungen) mit der Backofen-Methode

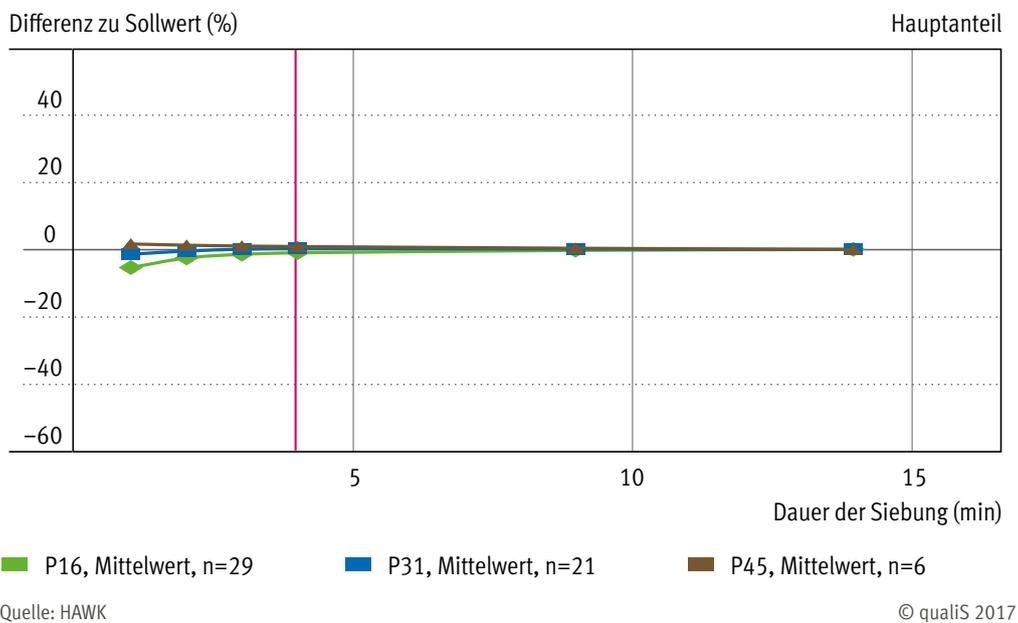
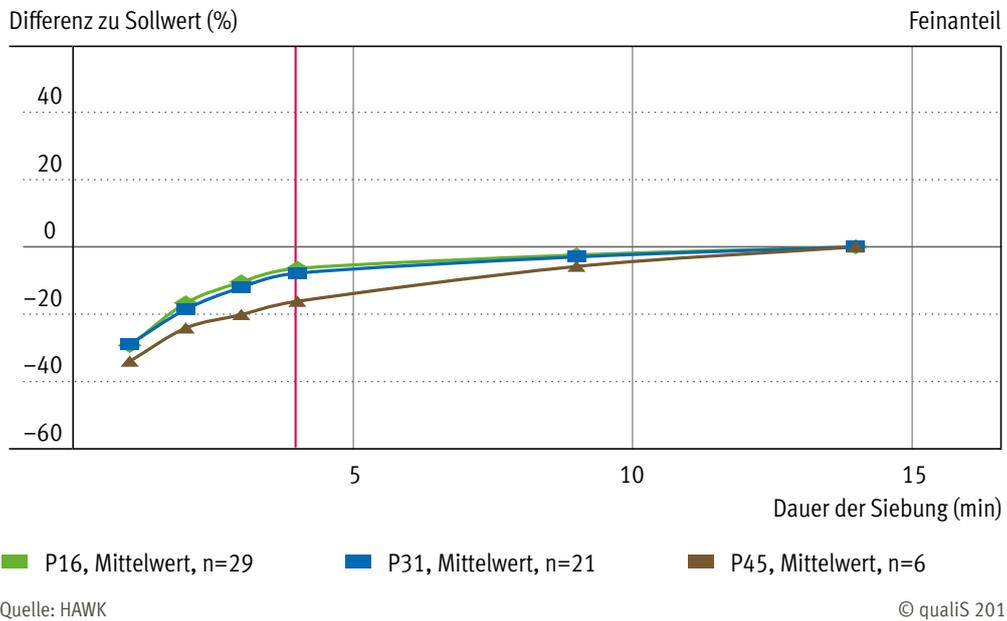
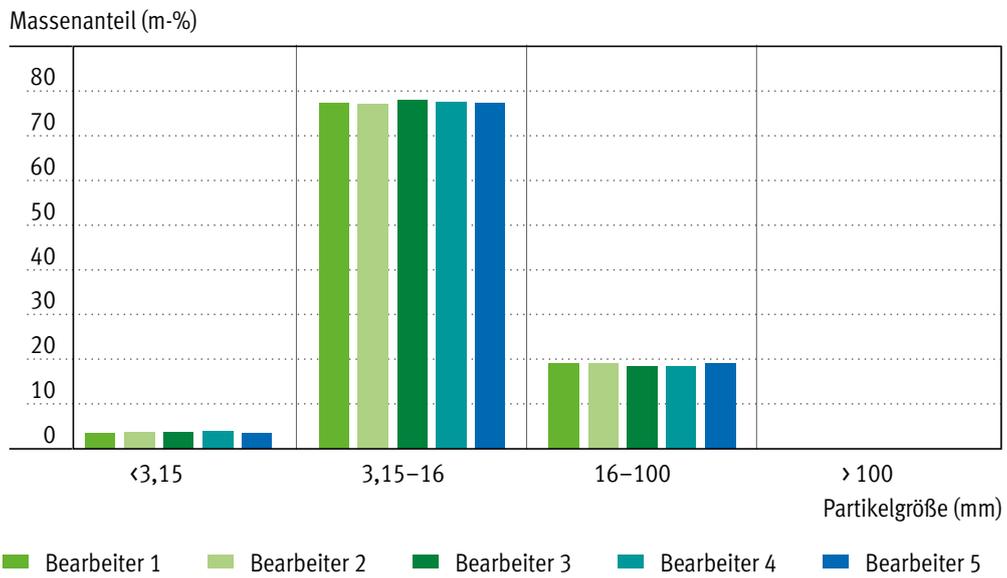
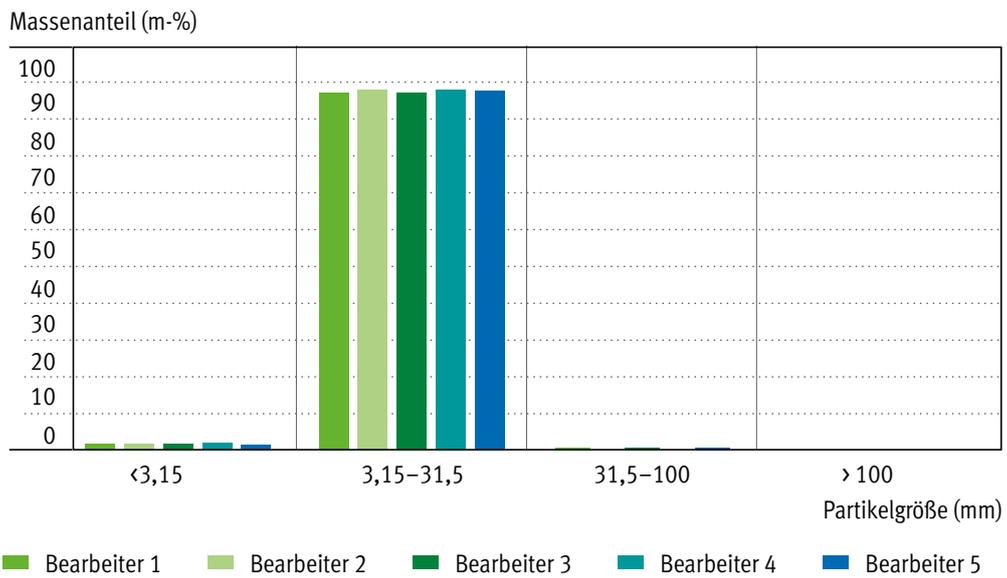


Abbildung 10.11: Intervallweise Siebung 4 × 1 min manuell (Sollwert: 2 × 5 min per Siebmaschine [DIN EN ISO 17827-1])



Quelle: HAWK

© qualiS 2017



Quelle: HAWK

© qualiS 2017

Abbildung 10.12: Parallele Siebung von Holzhackschnitzelproben der Partikelgrößenklassen P16 (oben) und P31 (unten) mit der vereinfachten Methode durch fünf Personen

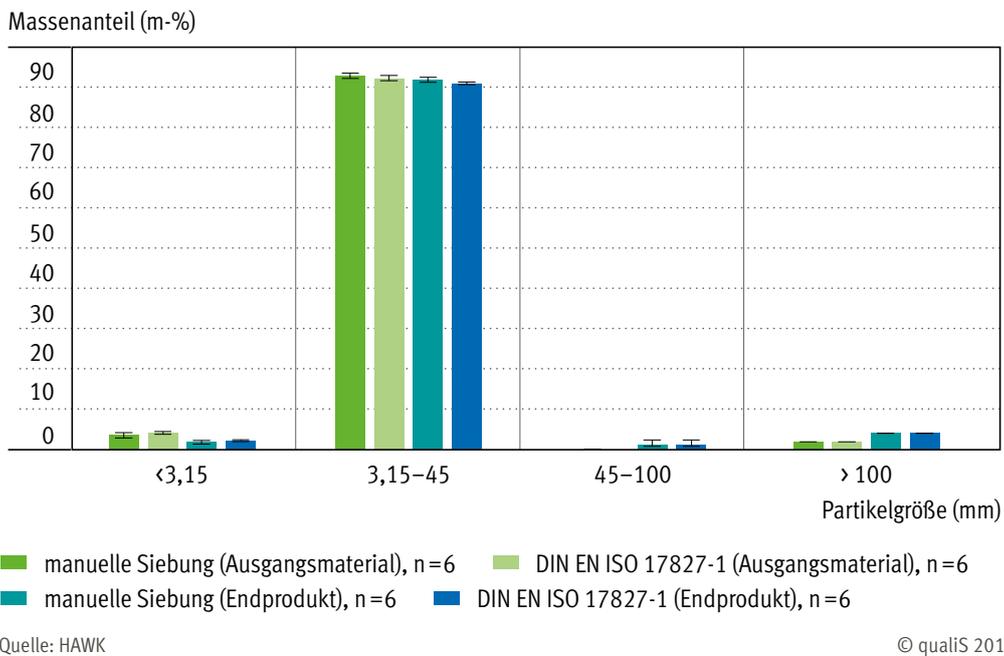
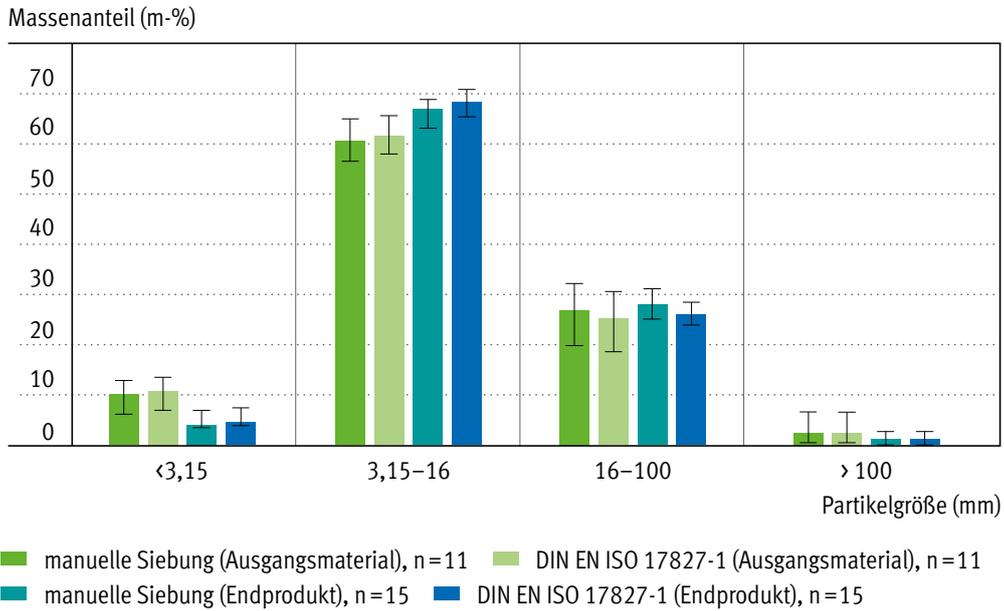


Abbildung 10.13: Herstellung P16-Holzhackschnitzel (Aufbereitung mittels Trommelsieb) (oben); Herstellung P45 (G50)-Holzhackschnitzel (Aufbereitung mittels Vortrocknung im Haufwerk, Sternsieb, Trocknung im Haufwerk unter Vlies) (unten), Siebung in Mehrfachbestimmung

11

ZUSAMMENFASSUNG

In dem über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) geförderten Verbundprojekt „qualiS – Brennstoffqualifizierung und Qualitätsmanagement in der Hackschnitzelproduktion als Beitrag zur Emissionsminderung und Nachhaltigkeit“ konnten zahlreiche Erkenntnisse zum deutschen Holz hackschnitzelmarkt und zur Produktion und Qualitätssicherung von qualitativ hochwertigen Holz hackschnitzeln für Anlagen der 1. BImSchV gewonnen werden.

Im Bereich „Marktanalyse“ wurde anhand der Messergebnisse des Bundesverbands des Schornsteinfegerhandwerks – Zentralinnungsverband (ZIV) der Bestand an Holz hackschnitzelfeuerungsanlagen < 1 MW im Jahr 2020 auf 64.280 Anlagen geschätzt. Die daraus abgeleitete Nennwärmeleistung beträgt rund 5,29 MW.

Die Anforderungen an und die Nachfrage nach einem qualitativ hochwertigen Brennstoff wurden zudem über eine Produzentenumfrage abgebildet. Für das Betriebsjahr 2015 verzeichneten rund ein Drittel der im Projekt befragten Hack-

schnitzelproduzenten Neukunden mit höheren Ansprüchen an die Holz hackschnitzelqualität. Diese Nachfrage könnte laut Produzenten in der Zukunft weiter steigen.

Basierend auf den Zahlen zum Anlagenbestand von 2020 und entsprechend summierten Nennwärmeleistungen sowie auf Grundlage zusätzlicher Annahmen zur Betriebsweise der Hackschnitzelfeuerungen und der Produzentenumfrage konnte der Brennstoffeinsatz nach Leistungsklassen aufgegliedert auf insgesamt ca. 3,3 Mio. Tonnen (atro) taxiert werden, der in Form von Holz hackschnitzeln in 1.-BImSchV-Anlagen energetisch verwertet wird.

Hohe Brennstoffqualitäten lassen sich durch eine sorgfältige Hackschnitzelproduktion entlang der gesamten Prozesskette herstellen. Mit Maßnahmen zur sekundären Brennstoffaufbereitung, z. B. Siebung und/oder Trocknung, lassen sich der Wassergehalt, der Aschegehalt, der Feinanteil und die Gehalte an verbrennungskritischen Inhaltsstoffen weiter verringern, sodass selbst mit sehr inhomogenem und möglicherweise verunreinigtem Ausgangsmaterial, wie beispielsweise Holz hackschnitzeln aus Waldrestholz, nach entsprechender Aufbereitung die Klassifikationen A1 bis B1 nach DIN EN ISO 17225-4 (2021) eingehalten werden können. Diese weiteren Aufbereitungsschritte sind jedoch auch mit Kosten verbunden. Die Höhe der Kosten ist im Wesentlichen abhängig von der eingesetzten Aufbereitungstechnik und den Durchsatzraten. Höhere Brennstoffqualitäten könnten aber auch zu höheren Verkaufspreisen führen, sodass die Produktion von qualitativ hochwertigen Holz hackschnitzeln durchaus wirtschaftlich sein kann. Es empfiehlt sich jedoch, die Wirtschaftlichkeit durch die anderweitige Verwertung des abgesiebten Materials (Überlängen und Feinanteil) zu steigern.

Die Brennstoffaufbereitung kann sich positiv auf das Emissionsverhalten der Feuerung auswirken. Zudem sichert sie zugleich einen störungsarmen Anlagenbetrieb. Unter den Bedingungen der Feuerungsversuche im Rahmen des Projektes, die ohne sekundäre Emissionsminderungsmaßnahmen durchgeführt wurden, konnte der Emissionsgrenzwert für Staub (0,02 g/m³ nach der Stufe 2 der 1. BImSchV) auch mit den mittels Siebung und Trocknung aufbereiteten Waldrestholz hackschnitzeln in einigen, jedoch nicht in allen Fällen eingehalten werden. Eventuell lassen sich Gesamtstaubemissionen durch



Siebung von Holz hackschnitzeln mit einem Trommelsieb.



Qualitativ hochwertige Holzhackschnitzel

weitere Maßnahmen in der Brennstoffproduktion (z. B. Wahl des Rohmaterials) oder in der Anlagentechnik (Brennraumgeometrie, Staubabscheider, Optimierung der Kesseleinstellung auf den Brennstoff) weiter verringern. Ohne Frage bleibt jedoch, dass ein qualitativ hochwertiger Brennstoff weitere Maßnahmen zur Emissionsminderung unterstützt.

Eine weitere sinnvolle Maßnahme bei der Herstellung von Holzhackschnitzeln ist die Einführung von qualitätssichernden Maßnahmen. Diese helfen dem Produzenten eine gleichbleibende und nachvollziehbare Brennstoffqualität zu gewährleisten. Der Wassergehalt und die Partikelgrößenverteilung sind maßgebliche Parameter bei der Beschreibung der Qualität von Holzhackschnitzeln und deren Emissionsverhalten. Im Verbundprojekt „qualiS“ wurden daher praxisnahe vereinfachte Methoden zur Bestimmung von Wassergehalt und Partikelgröße entwickelt, die für Vor-Ort-Bestimmungen eine ausreichende Übereinstimmung mit den Standardmethoden nach DIN EN ISO 17225-4 aufweisen. Diese Methoden sind im Vergleich zu den Standardverfahren nach Norm mit relativ geringem Kosten- und Arbeitsaufwand umsetzbar. Eine allgemein verständliche Anleitung und ein Excel-Auswertblatt stehen zur Verfügung unter:

mediathek.fnr.de/broschuren/bioenergie/feste-biobrennstoffe/handbuch-zum-qualitatsmanagement-von-holzhackschnitzeln.html.

Mithilfe der im Handbuch aufgezeigten Maßnahmen und Handlungsempfehlungen kann also die Qualität des Brennstoffs Holzhackschnitzel optimiert und langfristig sichergestellt werden. Ein qualitativ optimierter Holzhackschnitzel trägt nicht nur zur Minimierung der Wartungsarbeiten an der Feuerungsanlage bei, sondern erlaubt auch einen emissionsarmen Heizbetrieb.



LITERATURVERZEICHNIS



Kapitel 2

- [2-1] **United Nations (UN):** Paris agreement. Abgerufen am 27.07.2021 unter: unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement
- [2-2] **Europäische Kommission:** Europäischer Grüner Deal – erster klimaneutraler Kontinent werden. Abgerufen am 27.07.2021 unter: ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_de
- [2-3] **Bundesregierung Deutschland:** Klimaschutzgesetz 2021 – Generationenvertrag für das Klima. Abgerufen am 27.07.2021 unter: www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschutzgesetz-2021-1913672
- [2-4] **Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK):** Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland unter Verwendung von Daten der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) – Stand Februar 2021. Abgerufen am 27.07.2021 unter: www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html
- [2-5] **Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR):** Marktübersicht Staubabscheider. Abgerufen am 29.07.2021 unter: heizen.fnr.de/heizen-mit-holz/marktuebersicht-staubabscheider
- [2-6] **Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR):** Hackschnitzelheizungen – Was muss beachtet werden? 3. Auflage, Gülzow 2018. Abgerufen am 31.03.2022 unter: mediathek.fnr.de/broschuren/bioenergie/feste-biobrennstoffe/hackschnitzelheizungen-was-muss-beachtet-werden.html
- [2-7] **Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR):** Leitfaden feste Biobrennstoffe, 4., vollständig überarbeitete Auflage, Gülzow 2014.
- [2-8] **Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK):** Richtlinie für die Bundesförderung für effiziente Gebäude – Einzelmaßnahmen (BEG EM) vom 16. September 2021. Abgerufen am 15.11.2022 unter: www.energiewechsel.de/KAENEF/Redaktion/DE/FAQ/FAQ-Uebersicht/Richtlinien/bundesfoerderung-fuer-effiziente-gebaeude-beg.html
- [2-9] **Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK):** Richtlinie für die Bundesförderung für effiziente Wärmenetze (BEW) vom 1. August 2022. Abgerufen am 15.11.2022 unter: www.energiewechsel.de/KAENEF/Redaktion/DE/Foerderprogramme/bew.html
- [2-10] **Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK):** Energieeffizienz in der Wirtschaft (Zuschuss) – Modul 2: Prozesswärme aus Erneuerbaren Energien. Abgerufen am 15.11.2022 unter: www.energiewechsel.de/KAENEF/Redaktion/DE/Foerderprogramme/energieeffizienz-in-der-wirtschaft-modul-2-prozesswaerme.html

Kapitel 3

- [3-1] **Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks – Zentralinnungsverband (ZIV):** Erhebungen des Schornsteinfegerhandwerks. Sankt Augustin 2012
- [3-2] **Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR):** Hackschnitzel-Heizungen Marktübersicht. 5. Auflage, Gülzow 2017.
- [3-3] **Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR):** Hackschnitzelkessel. Abgerufen am 20.07.2021 unter: www.die-nachwachsende-produktwelt.de
- [3-4] **Technologie- und Förderzentrum (TFZ):** Merkblatt Wirtschaftlichkeit von Biomassefeuerungen – Stand Januar 2020. Straubing 2020
- [3-5] **Centrales Agrar-Rohstoff-Marketing- und Energie-Netzwerk e. V. (C.A.R.M.E.N. e. V.):** Preisentwicklung bei Holzhackschnitzeln. Abgerufen am 26.07.2021 unter: www.carmen-ev.de/service/marktueberblick/marktpreise-energieholz/marktpreise-hackschnitzel/
- [3-6] **Statistisches Bundesamt:** Erzeugerpreisindex gewerblicher Produkte – Fachserie 17 Reihe 2 (GP-Nummer „1610 23“, Holz in Form von Plättchen oder Schnitzeln [ohne Waldhackschnitzel]). Abgerufen am 26.07.2021 unter: www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Preise/Erzeugerpreisindex-gewerbliche-Produkte/FAQ/holzpellets.html
- [3-7] **Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR):** Hackschnitzelheizungen – Was muss beachtet werden? 3. Auflage, Gülzow 2018.

Kapitel 5

- [5-1] **Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.; Hofbauer, H. (2016):** Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren. 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin.
- [5-2] **Kuptz, D.; Schulmeyer, F.; Hüttl, K.; Dietz, E.; Turowski, P.; Zormaier, F.; Borchert, H.; Hartmann, H. (2015):** Optimale Bereitstellungsverfahren für Holzhackschnitzel. Eigenverlag Technologie- und Förderzentrum (TFZ) Straubing & Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Straubing & Freising-Weihenstephan.
- [5-3] **Sommersacher, P.; Brunner, T.; Obernberger, I. (2012):** Fuel Indexes: A Novel Method for the Evaluation of Relevant Combustion Properties of New Biomass Fuels. In: Energy & Fuels Bd. 26, Nr. 1, S. 380–390.
- [5-4] **Deutsches Institut für Normung e. V. (2021):** DIN EN ISO 17225-4 Biogene Festbrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen – Teil 4: Klassifizierung von Holzhackschnitzeln. Berlin, Beuth Verlag.

- [5-5] **Deutsches Institut für Normung e. V. (2021):** DIN EN ISO 17225-9 Biogene Festbrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen – Teil 9: Klassifizierung von grobem Schredderholz und Holzhackschnitzeln für die industrielle Verwendung. Berlin, Beuth Verlag.
- [5-6] **Deutsches Institut für Normung e. V. (2014):** DIN EN ISO 17225-1 Biogene Festbrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen. Berlin, Beuth Verlag.

Kapitel 6

- [6-1] **Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.; Hofbauer, H. (2016):** Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren. 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin.
- [6-2] **Kuptz, D.; Schulmeyer, F.; Hüttl, K.; Dietz, E.; Turowski, P.; Zormaier, F.; Borchert, H.; Hartmann, H. (2015):** Optimale Bereitstellungsverfahren für Holzhackschnitzel. Eigenverlag Technologie- und Förderzentrum (TFZ) Straubing & Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Straubing & Freising-Weihenstephan.
- [6-3] **Dietz, E.; Kuptz, D.; Blum, U.; Schulmeyer, F.; Borchert, H.; Hartmann, H. (2016):** Qualität von Holzhackschnitzeln in Bayern. Eigenverlag Technologie- und Förderzentrum (TFZ) Straubing & Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Straubing & Freising-Weihenstephan.

Kapitel 7

- [7-1] **Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.; Hofbauer, H. (2016):** Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren. 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin.
- [7-2] **Dietz, E.; Kuptz, D.; Blum, U.; Schulmeyer, F.; Borchert, H.; Hartmann, H. (2016):** Qualität von Holzhackschnitzeln in Bayern. Eigenverlag Technologie- und Förderzentrum (TFZ) Straubing & Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Straubing & Freising-Weihenstephan.
- [7-3] **Deutsches Institut für Normung e. V. (2021):** DIN EN ISO 17225-4 Biogene Festbrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen – Teil 4: Klassifizierung von Holzhackschnitzeln. Berlin, Beuth Verlag.
- [7-4] **Kuptz, D.; Schulmeyer, F.; Hüttl, K.; Dietz, E.; Turowski, P.; Zormaier, F.; Borchert, H.; Hartmann, H. (2015):** Optimale Bereitstellungsverfahren für Holzhackschnitzel. Eigenverlag Technologie- und Förderzentrum (TFZ) Straubing & Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Straubing & Freising-Weihenstephan.

Kapitel 8

- [8-1] **Nussbaumer, T. (1997):** Primary and Secondary Measures for the Reduction of Nitric Oxide Emissions from Biomass Combustion. In: Bridgwater, A. V.; Boocock, D. G. B. (Hrsg.): Developments in Thermochemical Biomass Conversion, Springer Netherlands.
- [8-2] **Loo, S. V.; Koopejan, J. (2008):** The handbook of biomass combustion and co-firing, London: Earthscan.
- [8-3] **Sommersacher, P.; Brunner, T.; Obernberger, I. (2012):** Fuel Indexes: A Novel Method for the Evaluation of Relevant Combustion Properties of New Biomass Fuels. In: Energy & Fuels Bd. 26.
- [8-4] **Zeng, T.; Weller, N.; Pollex, A.; Lenz, V. (2016):** Blended biomass pellets as fuel for small scale combustion appliances: Influence on gaseous and total particulate matter emissions and applicability of fuel indices. In: Fuel Bd. 184.

Kapitel 9

- [9-1] **Kuptz, D.; Schulmeyer, F.; Hüttl, K.; Dietz, E.; Turowski, P.; Zormaier, F.; Borchert, H.; Hartmann, H. (2015):** Optimale Bereitstellungsverfahren für Holzhackschnitzel. Eigenverlag Technologie- und Förderzentrum (TFZ) Straubing & Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Straubing & Freising-Weihenstephan.
- [9-2] **Denkinger, B. (2005):** Wie forstliche Hacker arbeiten. In: LWF aktuell 48, Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Freising-Weihenstephan.
- [9-3] **Hartmann, H. (2014):** Produktion, Bereitstellung und Eigenschaften biogener Festbrennstoffe. In: Leitfaden biogene Festbrennstoffe, Hrsg.: FNR e.V., Gülzow.
- [9-4] **Bosch, T.; Neuhof, I.; Mergler, F.; Zornmaier, F.; Weinert, B.; Hüttl, K. (2012):** Qualitätssicherung bei der Lagerung von Hackschnitzeln. In: Merkblatt 11 – Hackschnitzel richtig lagern! Hrsg.: Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), Freising.

Kapitel 10

- [10-1] **Deutsches Institut für Normung e. V. (2011):** DIN EN 14778 Feste Biobrennstoffe – Probenahme, Berlin, Beuth Verlag.
- [10-2] **Deutsches Institut für Normung e. V. (2011):** DIN EN 14780 Feste Biobrennstoffe – Probenherstellung, Berlin, Beuth Verlag.
- [10-3] **Deutsches Institut für Normung e. V. (2014):** DIN EN ISO 17225-1 Biogene Festbrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen. Berlin, Beuth Verlag.



Fachagentur Nachhaltige Rohstoffe e. V. (FNR)
OT Gülzow, Hofplatz 1
18276 Gülzow-Prüzen
Tel: 03843/6930-0
Fax: 03843/6930-102
info@fnr.de
www.fnr.de

Folgen Sie uns:    

Gedruckt auf 100 % Recyclingpapier
mit Farben auf Pflanzenölbasis

Bestell-Nr. 910
mediathek.fnr.de
FNR 2023

