

Programm Lebensgrundlage Umwelt  
und ihre Sicherung (BWPLUS)

## **Optimierung der Feuerungstechnik zur Wärmeerzeugung aus auf- bereiteten Durchforstungsreststoffen**

H. G. Heller, G. Baumbach  
Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen,  
Abteilung Reinhaltung der Luft, Universität Stuttgart

Förderkennzeichen: BWD 21006

Die Arbeiten des Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung werden mit  
Mitteln des Landes Baden-Württemberg gefördert

Juni 2004

## Inhaltsverzeichnis

	<i>Zusammenfassung</i> .....	3
	<i>Summary</i> .....	3
1	Einführung .....	4
2	Quellen und Holzbrennstoffqualitäten.....	5
2.1	Begriffsdefinitionen und Nomenklatur.....	6
2.2	Die europäische Normung .....	8
2.3	Auswahl von Brennstoffen verschiedener Herkunft und Qualität.....	16
2.4	Wirtschaftlich nutzbare Potenziale an Waldholz.....	20
3	Brennstoffaufbereitung .....	24
3.1	Die Zerkleinerung .....	25
3.1.1	Hacker.....	25
3.1.2	Schredder .....	27
3.2	Die Trocknung .....	29
3.2.1	Lagerung .....	29
3.2.2	Aktive Trocknung .....	30
3.3	Die Klassierung .....	33
3.4	Das Verschneiden .....	34
3.5	Die Kompaktierung .....	35
3.6	Verfahrensweise zur Optimierung der Brennstoffqualität .....	36
3.7	Energetischer Aufwand und Kosten von Aufbereitungsverfahren.....	38
4	Charakterisierung der ausgewählten Brennstoffe.....	40
4.1	Physikalische Charakterisierung.....	40
4.1.1	Wassergehalt.....	41
4.1.2	Brennwert und Heizwert.....	42
4.1.3	Korngrößenverteilung von Brennstoffpartikeln .....	43
4.1.3.1	Methoden zur Bestimmung der Korngrößenverteilung.....	43
4.1.3.2	Bestimmung der Korngrößenverteilung der untersuchten Brennstoffe.....	46
4.1.4	Schüttdichte .....	51
4.1.5	Bestimmung von flüchtigen Bestandteilen und Aschegehalt.....	52
4.1.5.1	Bestimmungsmethoden .....	52
4.1.5.2	Flüchtige Bestandteile und Aschegehalt der untersuchten Brennstoffe .....	54

4.2	Chemische Charakterisierung .....	55
4.2.1	Die Elementaranalyse .....	56
4.2.2	Die Aschenanalyse .....	58
5	Verbrennungsverhalten von Waldholzbrennstoffen .....	59
5.1	Versuchsaubau, Messtechnik und Versuchsparameter .....	59
5.2	Nicht aufbereitete Brennstoffe .....	66
5.3	Aufbereitete Brennstoffe .....	79
5.4	Brennstoffe und Emissionsergebnisse aus der Praxis .....	89
6	Optimierung der Feuerungstechnik .....	99
6.1	Mindestanforderungen an Waldholzbrennstoffe .....	99
6.2	Optimierungspotenziale der Feuerungstechnik .....	101
7	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen .....	103
8	Literaturliste .....	105

## **Optimierung der Feuerungstechnik zur Wärmeerzeugung aus aufbereiteten Durchforstungsreststoffen**

H. G. Heller, G. Baumbach; Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen, Abteilung Reinhaltung der Luft, Universität Stuttgart

### ***Zusammenfassung***

Die Aufbereitung von Reststoffen aus der Forstwirtschaft ist ein wichtiger Schritt zur konsequenten Nutzung der Potenziale an biogenen Festbrennstoffen auf einem der neuesten europäischen Umweltgesetzgebung entsprechenden Emissionsniveau. Im vorliegenden Projekt wurde das Spektrum an Durchforstungsreststoffen in Baden-Württemberg nach Herkunft und Beschaffenheit erfasst sowie laboranalytisch und in Verbrennungsversuchen untersucht. Es wurde eine Strategie zur Aufbereitung entwickelt, welche die Qualität bereits genutzter Holzbrennstoffsorimente verbessert und die Möglichkeit für die integrierte Produktion zusätzlicher hochwertiger Brennstoffe eröffnet.

Im zweiten Teil des Vorhabens wurden die aufbereiteten Brennstoffe auf ihr Verbrennungsverhalten hin untersucht und die Feuerungstechnik für ihren Einsatz optimiert. Ihre Verwendung wird energetisch und betriebswirtschaftlich bewertet.

## **Optimisation of Combustion Technology for Heat Generation from Forrestral Residues**

H. G. Heller, G. Baumbach; Institute for Process Engineering and Power Plant Technology, Department for Air Pollution Prevention, Stuttgart University

### ***Summary***

Conditioning of forestal residues is an important measure to utilise the potential of solid biofuels while keeping an emission level appropriate to the latest European environmental legislation. In the present investigation the range of forestal residues in Baden-Württemberg was acquired according to the quality and origin, chemical analysis were made and the combustion behaviour was experimentally investigated. A procedure was developed, to enhance quality of currently used assortments of solid biofuels and additionally to produce high-value fuels in a production process integrated manner.

In the second step of the investigation, conditioned fuels hat been examined on their combustion behaviour and the combustion technology was optimised. Their utilisation has been evaluated from an energetic and an economic point of view.

# 1 Einführung

Sollen zukünftig im Zuge der Bestrebungen die CO<sub>2</sub>-Emission zu mindern bisher nicht genutzte Reststoffe aus der Waldbewirtschaftung und der Landschaftspflege zur Wärmegegewinnung in Hackschnitzelfeuerungen genutzt werden, wird dies ohne weitere Emissionsminderungsmaßnahmen zu erhöhten Abgasemissionen führen, da Feuerungsanlagen bislang nicht in der Lage sind, wechselnde Brennstoffeigenschaften zu erkennen und Regelungseinstellungen entsprechend zu optimieren. Dies führt von Akzeptanzproblemen in der Nachbarschaft von Feuerungsanlagen bis hin zur Gesundheitsgefährdung von Anwohnern und ist im Rahmen der europaweiten Anstrengungen zur Verminderung der Feinstaubkonzentrationen in der Luft nicht hinnehmbar.

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, ein Verfahren zu entwickeln und darzustellen, um aus in ihrer Qualität sehr unterschiedlichen Grundstoffen definierte Brennstoffe herzustellen, die mit einfacher Feuerungstechnik emissionsarm verbrannt werden können. Die eingesetzte Feuerungstechnik soll dahingehend optimiert werden, dass mit den aufbereiteten Brennstoffen keine sekundäre Abgasreinigung notwendig ist.

Die betrachteten Aufbereitungsschritte umfassen die Zerkleinerung, Klassierung und Trocknung bis hin zur Kompaktierung unterschiedlicher Rohstoffe aus der Forstwirtschaft und der Landschaftspflege. Auf diese Weise wird zum einen die Qualität der bereits heute thermisch genutzten Waldholzbrennstoffe erhöht, zum anderen wird die Möglichkeit untersucht, die Produktion zusätzlicher hochwertiger Qualitäten in die Aufbereitungsprozesse zu integrieren. Die Möglichkeiten und Grenzen von Feuerungstechnik und Brennstoffaufbereitung zur Senkung der Feinstaubemissionen beizutragen, sollen untersucht werden. Insbesondere soll geklärt werden, ob auf Entstaubungsanlagen zur Abgasreinigung verzichtet werden kann, wenn die Verbrennungsluftführung auf die verwendete Brennstoffqualität hin optimiert wird.

## 2 Quellen und Holzbrennstoffqualitäten

Holz zur thermischen Nutzung als Brennstoff, stammt in Baden-Württemberg aus drei Quellen: **Forstwirtschaft** und **Landschaftspflege** liefern Holzsortimente, die sich grob unter dem Begriff „Durchforstungsreststoffe“ zusammenfassen lassen. Die landwirtschaftliche Erzeugung von Energiepflanzen eröffnet eine weitere Quelle, die sich jedoch nicht unter diesem Begriff einordnen lässt und deshalb in der vorliegenden Untersuchung ausgespart bleibt.

In der **Forstwirtschaft** fällt Holz zur thermischen Nutzung bei Arbeitstätigkeiten an, die sich aus den Erfordernissen der modernen Waldbewirtschaftung ergeben:

Als **Holzeinschlag** oder **Holzernte** bezeichnet man die Gewinnung von Nutzholz zur wirtschaftlichen Vermarktung. Sie stellt den Endnutzen der forstwirtschaftlichen Tätigkeit dar. Primäres Ziel ist hierbei die Gewinnung von hochwertigen und damit gewinnträchtigen Holzqualitäten für die Möbel- und Bauindustrie. Geringwertigere Sortimente werden in der Zellstoff- und der Spanplattendindustrie als Grundstoff verwendet. Eine unter ökonomischen Gesichtspunkten optimierte, nachhaltige Forstwirtschaft erfordert weiter eine regelmäßige **Waldpflege**. Unter diesem Begriff seien hier alle Maßnahmen zusammengefasst die im Lebenszyklus eines Waldes zur Erhaltung des Gesamtökosystems ebenso wie zur Erzielung eines optimalen betriebswirtschaftlichen Ergebnisses erforderlich sind. Beide Arbeitstätigkeiten der Forstbewirtschaftung liefern Grundmaterial für die Herstellung von Holzbrennstoffen, das zwar hinsichtlich seines forstwirtschaftlichen Ausgangssortimentes unterschiedlichen Ursprungs sein kann, in aufbereiteter Form jedoch qualitativ sehr ähnliche Brennstoffe liefert. Eine getrennte Betrachtung der beiden Arbeitstätigkeiten Holzernte und Waldpflege ist aus forstwissenschaftlicher Sicht nicht sinnvoll [1]. Im Folgenden sei deshalb auf den Ursprung von Holzbrennstoffen weniger Augenmerk gerichtet, als vielmehr auf ihre qualitative Beschaffenheit.

Die Gestaltung öffentlicher und privater Grünflächen bildet eine weitere Quelle für Holz zur thermischen Nutzung, die unter dem Begriff **Landschaftspflege** zusammengefaßt wird. Die **Grünflächenpflege**, deren Reststoffe vielfach zentral auf kommunalen Häckselplätzen gesammelt werden und die Randbegrünung von Straßen, die in regelmäßigen Abständen zurückgeschnitten werden muß, liefert als **Straßenbegleitgrün** Holz das der Verbrennung zugeführt werden kann. Der Begriff des Durchforstungsreststoffes erscheint im Zusammenhang mit diesem Material zunächst wenig passend. Bei beiden Fraktionen handelt es sich um Gemische bestehend aus Heckenschnitt, Sträuchern und kleinen Bäumen mit stark schwankenden Anteilen von Fremdstoffen wie Erde, Laub, Gras und Kunststoff bis hin zu Hausmüll und Metall. Die Nutzung dieser Sortimente als Brennstoff macht eine Aufarbeitung erforderlich. Jedoch liefert diese Quelle mit Holz aus dem Rückschnitt von Obstbäumen einen Ausgangsstoff, der als Hackschnitzel aufgearbeitet, kaum von Holz aus der Forstwirtschaft zu unterscheiden ist.

## 2.1 Begriffsdefinitionen und Nomenklatur

Die Erläuterungen im vorigen Abschnitt zeigen, dass die Bezeichnung Durchforstungsreststoff im Vorhabentitel unglücklich gewählt ist, da sie sich streng genommen nur auf einen einzelnen Verfahrensschritt der Forstbewirtschaftung bezieht. Es wird außer acht gelassen, dass andere Quellen und Arbeitstätigkeiten ebenfalls Holz liefern, das in aufbereiteter Form als biogener Festbrennstoff eine vergleichbare Qualität aufweist. Ein Schwerpunkt der vorliegenden Untersuchung liegt aber gerade auf der Beurteilung von Holz aus verschiedenen Quellen auf seine Eigenschaften und Eignung als Brennstoff.

Während die Grundstoffe aus der **Landschaftspflege** dabei recht einfach zu benennen und zu beschreiben sind, wird auf Holz aus der **Forstwirtschaft** eine aus Tradition, Forstwissenschaft und moderner Betriebswirtschaft entstandene Nomenklatur angewandt, die dem Außenstehenden nicht ohne weiteres zugänglich ist. Vor diesem Hintergrund sind die Bezeichnungen der Forstwirtschaft für Ausgangsmaterialien zur Herstellung von Brennstoffen kritisch zu beleuchten und insbesondere der Sortimentsbegriff zu hinterfragen.

Der Zweck forstwirtschaftlicher Tätigkeit konzentriert sich, wie Eingangs erwähnt auf die Erzeugung möglichst hochwertiger Holzqualitäten. Bereits in der Vergangenheit spielte jedoch die Ausformung von Brennholz zur energetischen Nutzung eine große Rolle, da sie eine wichtige Einnahmequelle der Forstwirtschaft darstellte. Bei geringerwertigen Sortimenten konkurrierten deshalb die Vermarktungswege Industrie- und Brennholz seit Beginn der Industrialisierung [2]. Aus heutiger Sicht bilden alle forstwirtschaftlichen Produkte, die nicht in die genannten industriellen und handwerklichen Vermarktungswege gelangen, Potenziale zur thermischen Nutzung. Der Sortimentsbegriff der Forstwirtschaft ist zur Bezeichnung solcher Produkte jedoch nicht hinreichend, da er vorrangig für Fraktionen verwendet wird, die gegenwärtig auch tatsächlich vermarktet werden. Die Ausformung zu einzelnen Sortimenten wie Langholz, Schichtholz oder auch Brennholz hängt davon ab, in welcher Form der zur Verfügung stehende Rohstoff Waldholz mit maximalem Ertrag verkauft werden kann. Das Spektrum momentan gehandelter Sortimente verschiebt sich also mit der Absatzsituation, was eine Identifikation von Energieholz im Rahmen dieser Nomenklatur schwierig macht. Beispielsweise ist im Zuge der schweren Herbststürme der Jahre 1990 (Vivian und Wiebke) und 1999 (Lothar) in Baden-Württemberg zusätzlich zum Holzeinschlag insgesamt eine Menge von ca. 25 Mio m<sup>3</sup> Sturmholz niedergebrochen [3]. Dessen Stammholzanteil steht aus Gründen der Marktregulierung für einen begrenzten Zeitraum zur thermischen Nutzung zur Verfügung, ungeachtet seiner zweifellos hochwertigen Sortierung.

Eine weitere Schwierigkeit im Umgang mit forstwirtschaftlichen Sortimentsbegriffen ergibt sich bei der Anwendung auf Produkte aus der Waldpflege. Eine Einordnung ist allenfalls für Holz aus der Durchforstung möglich, während Reststoffe aus anderen Pflegemaßnahmen wie etwa der Dickungspflege unberücksichtigt bleibt, obwohl eine thermische Nutzung zumindest möglich wäre. Hinzu kommen regional unterschiedliche Bezeichnungen für an sich gleiche Sortimente. Grundsätzlich bleibt für Holz aus forstwirtschaftlichen Quellen festzustellen, daß alle Reststoffe gleichermaßen für die thermische Nutzung geeignet sind. Einschränkungen ergeben sich aus wirtschaftlichen und ökologischen Zusammenhängen, die somit auch die Definition des Begriffes Reststoff bestimmen. Hierunter ist alles zu verstehen, was

- A. betriebswirtschaftlich nicht anderweitig vermarktet werden kann und
- B. aus ökologischer Sicht nicht genutzt werden soll.

Im Zuge der Nutzung von Holz als regenerativem Energieträger hat sich im deutschen Sprachraum eine eigene, ebenfalls nicht einheitliche und zum Teil mißverständliche Nomenklatur etabliert. Während in Deutschland beispielsweise der Begriff **Waldrestholz** für ein naturbelassenes, von Schadstoffen unbelastetes Holz gut eingeführt ist, wird er in Österreich und in der Schweiz nicht verwendet. Bezeichnungen wie **Hackgut** werden teils für den Grundstoff, teils für das Produkt, d.h. den aufbereiteten Brennstoff verwendet.

Die Betrachtungen zeigen, daß ein einheitliches nachvollziehbares Bezeichnungssystem für die Quellen von Holzbrennstoffen ebenso wie für die qualitative Unterscheidung dringend erforderlich ist. Eine Möglichkeit hierzu wird durch die europäische Normung auf dem Gebiet der biogenen Festbrennstoffe eröffnet.



## 2.2 Die europäische Normung

Die Arbeitsgruppe 2 des Technischen Komitee 335 des Comité Européen de Normalisation CEN hat im Laufe der letzten drei Jahre einen Entwurf zur Normung naturbelassener biogener Festbrennstoffe erarbeitet. Der Entwurf besteht aus einer Reihe von einzelnen technischen Beschreibungen, die sich mit der Produktion und Bereitstellung für Brennstoffe auf der Basis von fester Biomasse befassen. Vor dem Hintergrund eines gesamteuropäischen Marktes soll dieses Normenwerk Handelsformen und -qualitäten biogener Festbrennstoffe eindeutig und unmissverständlich definieren, ihre physikalischen und chemischen Eigenschaften dokumentieren sowie im Zweifelsfall durch geeignete Untersuchungsmethoden transparent machen. Der Normenvorschlag erstreckt sich auf die gesamte Bereitstellungskette für biogene Energie auf Feststoffbasis von der Quelle von Biomasse, über die Produktion von Biobrennstoffen bis hin zur energetischen Umwandlung. Er soll sowohl die Verständigung zwischen Brennstoffanbietern und Kunden als auch mit Herstellern von Feuerungsanlagen auf eine einheitliche Grundlage stellen. Weiter soll die Norm als Referenz für nationale und europäische Rechtsvorschriften dienen können. Die Abbildung 1 verdeutlicht den Anwendungsbereich der Normenvorschläge des Technischen Komitees (TC) 335.

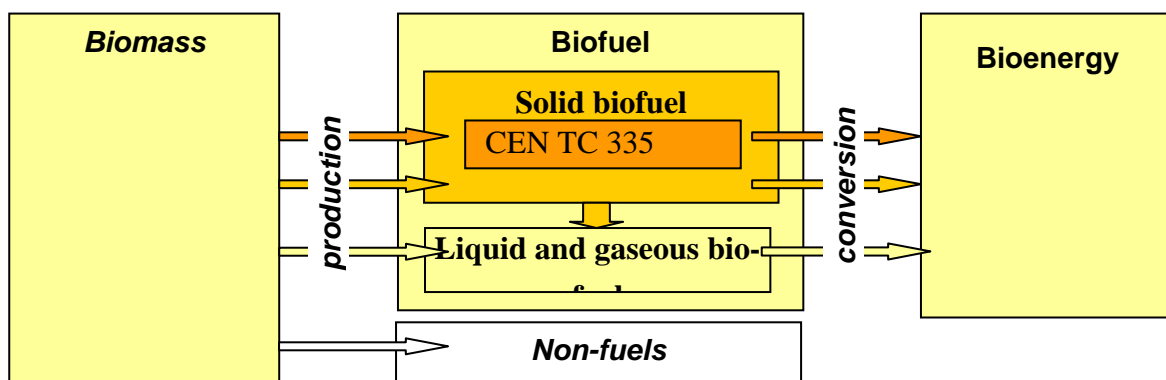


Abbildung 2.1: Aufgabenstellung der CEN TC 335 im Rahmen des Themengebietes Biomasse – Biobrennstoffe - Bioenergie

Der Projektleiter der vorliegenden Untersuchung ist deutscher Vertreter in der Arbeitsgruppe, die den Normentwurf zur Brennstoffspezifizierung und –klassifizierung erarbeitet hat (Working Group 2: „Fuel Specification, Classes and Quality Assurance“, kurz CEN TC 335 WG2) [4]. Weitere Gruppen beschäftigen sich mit der verwendeten Terminologie, entwickeln Methoden zur Probenahme, zur physikalischen Charakterisierung und zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung.

Für die Herkunft von Biomasse als fester Brennstoff biogenen Ursprungs sind von der CEN genaue Vorgaben erlassen worden. Das Mandat des CEN-Ausschusses TC 335 umfaßt Biomasse aus den nachfolgend genannten Quellen, die sich zur thermischen Nutzung eignen:

- Produkte aus der Landwirtschaft und der Forstwirtschaft
- Pflanzliche Abfälle aus der Landwirtschaft und der Forstwirtschaft
- Pflanzliche Abfälle aus der Lebensmittel verarbeitenden Industrie
- Gebrauchtholz, mit Ausnahme von Gebrauchtholz, das halogenorganische Stoffe oder Schwermetalle in Folge einer Behandlung mit Holzschutzmitteln oder durch Beschichtungen enthält und das insbesondere Altholz aus der Bauindustrie und dem Abriss von Bauten enthält.
- Faserförmige pflanzliche Abfälle aus der Zellstoffproduktion und aus der Papierproduktion aus natürlichen Grundstoffen, wenn sie auf dem Wege der Mitverbrennung an ihrem Produktionsstandort unter Nutzung der entstehenden Abwärme verbrannt werden.
- Korkabfälle

Die wichtigste Teilaufgabe für die Arbeitsgruppe 2 besteht in der Einteilung der Stoffe oben genannter Herkunft in ein einheitliches, europaweit anwendbares Raster. Die Klassifizierung von naturbelassenen biogenen Festbrennstoffen nach dem Normvorschlag der CEN TC 335 WG 2 basiert dabei im wesentlichen auf zwei Angaben:

1. **Ursprung und Quelle** von Grund- und Reststoffen sind entsprechend der Tabelle 1 zu spezifizieren, die alle denkbaren Herkunftsmöglichkeiten aus den oben genannten Quellen berücksichtigt.
2. Die **Handelsform** bestimmt das äußerliche Erscheinungsbild eines biogenen Festbrennstoffes. Die Tabelle 2 definiert Haupthandelsformen anhand der eine Einordnung aller Erscheinungsformen vorgenommen werden soll.

Die Spezifikation von Quellen orientiert sich am biologischen Ursprung und an der physikalischen Beschaffenheit der oben angeführten Produkte und Reststoffe aus der Land- und Forstwirtschaft. Folgende vier Hauptgruppen werden hierarchisch, d.h. beginnend mit der hochwertigsten Qualität unterschieden, nämlich

1. *Holzartige Biomasse*
2. *Halmgutartige Biomasse*
3. *Fruchtartige Biomasse*
4. *Verschnitt und (zufällig entstandene) Gemische*

Die hierarchische Struktur ergibt sich aus der verbrennungstechnischen Bewertung nach Energieinhalt und chemischer Zusammensetzung:

*Holzartige Biomasse* stammt von Bäumen, Büschen und Gesträuch. Die chemischen Hauptbestandteile Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff sowie ein geringer Fremdstoffanteil von wenigen Prozent lassen einen hohen Heizwert und geringe Verbrennungs- und Emissionsprobleme erwarten.

*Halmgutartige Biomasse* kommt von Pflanzen, die keinen holzartigen Stamm aufweisen und nach der Wachstumsperiode absterben. Ihre geringe Lebensdauer bedingt einen signifikanten Anteil an Alkalien und Chlor in der chemischen Zusammensetzung. Diese wichtigen Elemente im Stoffwechsel belebter Materie verursachen jedoch verbrennungs- und emissionstechnisch Probleme (s. Kap 2.2.5 und 2.2.6).

*Fruchtartige Biomasse* stammt aus dem Teil der Pflanze der die Samen enthält. Hierzu gehören Kernobst oder Beeren mit zumeist stark wasserhaltigen Früchten und damit energetisch geringwertiger Biomasse mit hohen Anteilen an Fremdstoffen.

Die Gruppe *Verschnitt und zufällig entstandene Gemische* besteht aus Biomasse verschiedenen Ursprungs und fällt zumindest zum Teil aus der hierarchischen Bewertung heraus, da auf dem Wege des Verschneidens durch eine gezielte Beeinflussung der Zusammensetzung hochwertige Brennstoffe herzustellen sind. Der Begriff des Gemisches bezieht sich auf zufällig entstandene Gemenge.

Der Zweck der Tabelle 1 besteht darin, Biobrennstoffe auf der Basis ihres Ursprungs beziehungsweise ihrer Quelle so detailliert wie erforderlich zu beschreiben und gegeneinander abzugrenzen. Deshalb sind die Haupt-Quellengruppen in weitere Untergruppen geteilt. Die zweite Gliederungsebene ist danach definiert, ob die Biomasse Produkte oder Reststoffe aus der Industrie sind oder ob es sich um Material natürlichen Ursprungs handelt. Die übrigen Unterteilungen dienen der vertieften Abgrenzung und Quellenzuordnung

Für die durchgeführten Untersuchungen ist nur die Hauptgruppe *Holzartige Biomasse* von Interesse. In der Tabelle 1 ist deshalb nur der diese Gruppe betreffende Teil der Gesamttabelle aus dem Normentwurf der CEN TC 335, Working Group 2: „Fuel specifications and classes“ wie-

dergegeben. Die Betrachtungen innerhalb dieser Hauptgruppe bleiben gemäß der Themenstellung auf die Quelle „Wald und Plantagenholz“ beschränkt. Quellen wie zum Beispiel Industrie-  
restholz, die im Rahmen der vorliegenden Untersuchung keine Rolle spielen, sind grau hinterlegt.

1. Holzartige Biomasse	1.1 Wald- und Plantagenholz	1.1.1 Vollbäume	1.1.1.1 Laubholz
			1.1.1.2 Nadelholz
			1.1.1.3 Kurzumtriebsholz
			1.1.1.4 Büsche
			1.1.1.5 Verschnitt und Gemische
		1.1.2 Stammholz	1.1.2.1 Laubholz
			1.1.2.2 Nadelholz
			1.1.2.3 Verschnitt und Gemische
		1.1.3 Waldrestholz	1.1.3.1 frisch/grün (mit Blättern/Nadeln)
			1.1.3.2 trocken
	1.1.4 Stümpfe	1.1.3.3 Verschnitt und Gemische	
		1.1.4.1 Laubholz	
		1.1.4.2 Nadelholz	
		1.1.4.3 Kurzumtriebsholz	
		1.1.4.4 Büsche	
	1.1.4.5 Verschnitt und Gemische		
1.1.5 Rinde (aus forstwirtschaftlichen Prozessen)*			
1.1.6 Landschaftspflegeholz			
1.2 Industrie-restholz	1.2.1 chemisch unbehandeltes Restholz	1.2.1.1 Holz ohne Rinde	
		1.2.1.2 Holz mit Rinde	
	1.2.2 chemisch behandeltes Restholz	1.2.1.3 Rinde (aus industriellen Prozessen)*	
		1.2.1.4 Verschnitt und Gemische	
1.2.3 faserförmige Restst. aus der Zellstoff- u. Papierindustrie	1.2.2.1 Holz ohne Rinde		
	1.2.2.2 Holz mit Rinde		
	1.2.2.3 Rinde (aus industriellen Prozessen)*		
	1.2.2.4 Verschnitt und Gemische		
1.3 Gebraucht-holz	1.3.1 chemisch unbehandeltes Holz	1.2.3.1 chem. unbehandelte faserförmige Reststoffe	
		1.2.3.2 chem. behandelte faserförmige Reststoffe	
1.4 Verschnitt und Gemische	1.3.2 chemisch behandeltes Holz	1.3.1.1 Holz ohne Rinde	
		1.3.1.2 Rinde*	
		1.3.1.3 Verschnitt und Gemische	
		1.3.2.1 Holz ohne Rinde	
		1.3.2.2 Rinde*	
		1.3.2.3 Verschnitt und Gemische	

Tabelle 2.1: Klassifizierung von biogenen Festbrennstoffen nach Ursprung und Quellen nach dem Vorschlag der CEN TC 335

Die Tabelle 2.1 ist geeignet, alle Quellen für Biomasse, soweit sie über das Mandat der CEN abgedeckt sind, für den gesamten europäischen Markt zu kategorisieren. Rohstoffe wie sie in Baden-Württemberg zur Energieversorgung herangezogen werden sollen sind ebenso in das Schema von Ursprung und Quelle einzuordnen wie Reststoffe der hochtechnisierten Forstwirtschaft in Skandinavien. Somit ist sie für die Quellenidentifikation im Rahmen des Forschungsvorhabens hervorragend geeignet.

Das äußerliche Erscheinungsbild eines biogenen Festbrennstoffes wird zum Teil durch die Beschaffenheit seines Rohstoffes bestimmt, größeren Einfluss hat jedoch die Form der Aufbereitung. Der Normenvorschlag der CEN trägt dieser Tatsache Rechnung, indem sogenannte Haupthandelsformen vordefiniert sind. Hierbei werden neben der Partikelgröße als Hauptcharakteristikum des Brennstoffes die Aufbereitungs- und Verarbeitungsverfahren berücksichtigt, die der Roh- oder Reststoff erfahren hat. Zerkleinerung, Kompaktierung, die Art der verwendeten Werkzeuge oder bereits die Ausformung im Forst bestimmen die physikalische Beschaffenheit eines Brennstoffes entscheidend. In der Tabelle 2.2 sind die Haupthandelsformen vertafelt.

Tabelle 2.2: Haupthandelsformen von biogenen Festbrennstoffen

<b>Brennstoffbezeichnung</b>	<b>Typische Partikelgröße</b>	<b>Aufbereitungsverfahren</b>
Briketts	Ø>25 mm	mechanische Komprimierung
Pellets	Ø<25 mm	mechanische Komprimierung
Staubförmiger Brennstoff	<1 mm	Mahlen
Sägespäne	1 – 5 mm	Zerkleinerung mit scharfen Werkzeugen
Holz hackschnitzel	5 – 100 mm	Zerkleinerung mit scharfen Werkzeugen
Shredderholz	unterschiedlich	Schlagzerspanung mit stumpfen Werkzeugen
Scheitholz	100 – 1000 mm	Zerkleinerung mit scharfen Werkzeugen
Stückholz	>500 mm	Zerkleinerung mit scharfen Werkzeugen
Kleine Strohballen	0,1 m <sup>3</sup>	Komprimiert und zu Quadern gebunden
Große Strohballen	3,7 m <sup>3</sup>	Komprimiert und zu Quadern gebunden
Runde Strohballen	2,1 m <sup>3</sup>	Komprimiert und zu Zylindern gebunden
Bündel	unterschiedlich	Der Länge nach gebündelt
Rinde	unterschiedlich	Reststoff von der Entrindung von Bäumen, zerkleinert oder unzerkleinert
Strohhäcksel	10 – 200 mm	Während der Ernte gehäckselt
Körner oder Samen	unterschiedlich	Keine Aufbereitung oder Trocknung
Schalen und Fruchtkerne	5 – 15 mm	Keine Aufbereitung
Faserkuchen	unterschiedlich	aus Faserschlamm durch Entwässerung hergestellt

Der Normenentwurf spezifiziert weitere physikalische und chemische Eigenschaften der Haupthandelsformen. Als wichtigstes Charakteristikum für eine möglichst emissionsarme Verbrennung ist der Wassergehalt zu nennen. Die Größe der Brennstoffpartikel, der Stickstoff- sowie der Aschegehalt und die Dichte und Abriebfestigkeit bei komprimierten Brennstoffen sind je nach Relevanz weiteren handelsformspezifischen Tabellen zu entnehmen. Zum Teil ist die Angabe bestimmter Eigenschaften obligatorisch, d. h. **normativ** (z.B. Partikelgröße, Aschegehalt und Wassergehalt), andere Kenngrößen können freiwillig quantifiziert werden. Sie werden als **informativ** bezeichnet wie etwa die Angabe des Heizwertes. Zur Bestimmung dieser Brennstoffeigenschaften sind von anderen Arbeitsgruppen des CEN TC 335 Standards und technische Anweisungen erstellt worden. Die Tabelle 2.3 gibt exemplarisch für die Detailspezifikation von Haupthandelsformen die möglichen Eigenschaften von Briketts wieder.

Sollen die Eigenschaften einer Brennstoffcharge die in den Handel gebracht wird gemäß der künftigen Europa-Norm spezifiziert werden, so sind für das angegebene Beispiel Holzhackschnitzel auf den Lieferpapieren (oder auch schon in vertraglichen Vereinbarung zwischen Brennstofflieferant und Kunden) folgende Angaben zwingend zu machen:

- Abmessungen der Hauptfraktion: z.B. P45
- Wassergehalt (in Massen%): z.B. M40
- Aschegehalt z.B. A1.5

Der Heizwert, die Schüttdichte oder der Chlorgehalt können, sofern bekannt freiwillig gemacht werden. Eine analytische Bestimmung der genannten Größen für jede Charge ist grundsätzlich nicht erforderlich, vielmehr können betreffend der chemischen Zusammensetzung Tabellen im Anhang der Norm herangezogen werden, wo langjährig Erfahrungswerte aus zahlreichen Einzelanalysen vertafelt sind. Dazu ist jedoch unbedingt die Angabe der Quelle des Brennstoffes gemäß Tabelle 2.1 erforderlich.

Physikalische Eigenschaften wie der Wassergehalt sind mit einiger Erfahrung auch abschätzbar. Der Größenverteilung hängt von der Beschaffenheit des Rohstoffes sowie von der verwendeten Zerkleinerungstechnik ab worauf im Kapitel 3 noch einzugehen ist.

Tabelle 2.3: Spezifikation der Eigenschaften der Haupthandelsform Holzhackschnitzel – wood chips

<b>Master table</b>			
<b>Origin:</b> According to clause 6.1 and Table 1.		Woody Biomass (1)	
<b>Traded Form:</b>		Wood Chips	
<b>Dimensions (mm)*)</b>			
	Main fraction > 80 % of weight	Fine fraction < 5%	Coarse fraction max. length of particle,
P16	$3,15 \text{ mm} \leq P \leq 16 \text{ mm}$	< 1 mm	max 1 %* > 45 mm, all < 85 mm
P45	$3,15 \text{ mm} \leq P \leq 45 \text{ mm}$	< 1 mm	max 1 %* > 63 mm
P63	$3,15 \text{ mm} \leq P \leq 63 \text{ mm}$	< 1 mm	max 1 %* > 100 mm
P100	$3,15 \text{ mm} \leq P \leq 100 \text{ mm}$	< 1 mm	max 1 %* > 200 mm
<b>Moisture (w-% as received)</b>			
M20	$\leq 20 \%$	Dried	
M30	$\leq 30 \%$	Suitable for storage	
M40	$\leq 40 \%$	Limited for storage	
M55	$\leq 55 \%$		
M65	$\leq 65 \%$		
<b>Ash (w-% of dry basis)</b>			
A0.7	$\leq 0,7 \%$		
A1.5	$\leq 1,5 \%$		
A3.0	$\leq 3,0 \%$		
A6.0	$\leq 6,0 \%$		
A10.0	$\leq 10,0 \%$		
<b>Nitrogen, N (w-% of dry basis)</b>			
N0.5	$\leq 0,5 \%$	Nitrogen is normative only for chemically treated biomass	
N1.0	$\leq 1,0 \%$		
N3.0	$\leq 3,0 \%$		
N3.0+	> 3,0 % (actual value to be stated)		
<b>Informative</b>	Net calorific value $q_{p,net,ar}$ (MJ/kg as received) or energy density, $E_{ar}$ (kWh/m <sup>3</sup> loose)		Recommended to be specified when retailed.
	Bulk density as received (kg/m <sup>3</sup> loose)		Recommended to be stated if traded by volume basis in categories (BD200, BD300, BD450)
	Chlorine, Cl (weight of dry basis, w-%)		Recommended to be stated as a category Cl 0.03, Cl 0.07, Cl 0.10 and Cl 0.10+ (if Cl >0,1% the actual value to be stated)

\*NOTE. The numerical values for dimension refer to the particle sizes passing through the mentioned round hole sieve size (3,15 mm, 16 mm, 45 mm, 63 mm and 100 mm). Dimensions of actual particles may differ from those values especially the length of the particle.



## 2.3 Auswahl von Brennstoffen verschiedener Herkunft und Qualität

Anhand der im vorigen Kapitel kurz beschriebenen Vorgehensweise zur Charakterisierung von biogenen Festbrennstoffen wurden für die experimentellen Untersuchungen im Rahmen des Forschungsvorhabens Brennstoffe aus dem in Baden-Württemberg zur Verfügung stehenden Quellen ausgewählt. Hauptkriterium für die Auswahl ist dabei die möglichst umfassende Abdeckung des qualitativen Spektrums wie es im Kapitel 2.1 beschrieben ist. Zur Bezeichnung der Brennstoffqualitäten wird die Tabelle 1 herangezogen.

Zur Untersuchung der Qualität von aufbereiteten Brennstoffen und zur Bewertung von Aufbereitungsverfahren ist zunächst die Kenntnis des Emissionsverhaltens bei der Verbrennung der Grundstoffe notwendig. Auf der Basis der Herkunftskategorie Waldholz (1.1) wurden dazu insgesamt sechs Brennstoffe ausgewählt, die außer der Zerkleinerung keine weitere Aufbereitung erfahren haben:

### Qualität I) - Vollbäume

Der Brennstoff besteht aus einem Gemisch von Laub- und Nadelholz mit sichtbaren Anteilen von Tannennadeln. Die Zerkleinerung erfolgte mit einem Mobilhacker (s. Kap. 3). Nach Auskunft des Lieferanten stammt er aus der Durchforstung weshalb eine Zuordnung als Mischfraktion von ganzen Bäumen (Herkunft: Punkt 1.1.1.5, Tab. 1: Verschnitt und Gemische) erfolgt.



### Qualität II) – Laubholz-Hackschnitzel

Der Brennstoff stammt von Stämmen aus unverkäuflichem Buchen-Sturmholz das bereits 1 bis 2 Jahre an der Waldstraße gelagert wurde. Die Stämme wurden mit einem stationären Trommelhacker zerkleinert.

(Herkunft: Punkt 1.1.2.1: Stammholz, Laubholz)

**Qualität III) – Nadelholz-Hackschnitzel**

Entsprechen der vorigen Qualität wurde hier Stammholz von Fichten gehackt. Die Bäume wurden mit einem stationären Trommelhacker zerkleinert

(Herkunft: Punkt 1.1.2.2: Stammholz, Nadelholz)

**Qualität IV) – Rinde (Fichtenholz)**

Die Fraktion besteht aus Fichtenrinde, die mit einem Schlagrotor zerkleinert wurde. Die Rinde stammt nicht aus dem Forst sondern aus einem Sägewerk und wurde zeitnah zur Verarbeitung angeliefert und untersucht. Der Wassergehalt war augenscheinlich sehr hoch. (Herkunft: Punkt 1.1.5: Rinde)

**Qualität V) – Landschaftspflegeholz (Straßenbegleitgrün)**

Sogenanntes Straßenbegleitgrün aus einem Landkreis in der Umgebung Stuttgarts, daß in dieser Form vom örtlichen Energieversorger in einer Holzfeuerungsanlage genutzt wird. Eine Mischfraktion vorwiegend aus Büschen und dünneren Zweigen mit Grün und Rindenanteil. Die Zerkleinerung erfolgte mit einem Schlagrotor.

(Herkunft: Punkt 1.1.6: Landschaftspflegeholz)

**Qualität VI) - Landschaftspflegeholz (Straßenbegleitgrün)**

Straßenbegeleitgrün von der Autobahn A6. Die Fraktion stammt vom Rückschnitt der Randstreifen- sowie der Mittelstreifenbegrünung. Obwohl das Ausgangsmaterial aus Büschen besteht ist hier die Einordnung in die Kategorie Landschaftspflegeholz geboten.

(Herkunft: Punkt 1.1.6 Landschaftspflegeholz)

Ausgangsmaterial für Aufbereitung von Waldholzbrennstoffen liefern die Untergruppen Stammholz 1.1.2, Waldrestholz 1.1.3 und Landschaftspflegeholz 1.1.6.

Es wurden insgesamt 4 Qualitäten untersucht. 2 Fraktionen basieren auf frischem Waldrestholz, jeweils ein Brennstoff auf sortenreinem Nadelholz und auf Landschaftspflegeholz. Die angewendeten Aufbereitungsverfahren werden im Kapitel 3 beschrieben.

#### **Qualität VII) - Waldhackschnitzel**

Sogenannter Schlagabraum wurde an der Waldstraße oder der Rückegasse maschinell gesammelt und mit einem Mobilhacker zerkleinert. Der Brennstoff wurde in zerkleinerter Form ca. 2 Wochen zwischengelagert und mit einem Radlader mehrfach umgesetzt. (Herkunft: Punkt 1.1.3.1: frisches Waldrestholz)



#### **Qualität VIII) - Waldhackschnitzel**

Der Brennstoff entspricht der Qualität VII), wurde jedoch zusätzlich einer Klassierung in einem Trommelsieb unterzogen um große Brennstoffpartikel aus der Fraktion zu entfernen.

(Herkunft: Punkt 1.1.3.1: frisches Waldrestholz)

#### **Qualität IX) – Landschaftspflegeholz**

Landschaftspflegeholz von Häckselplätzen wurde mit einem Schlagrotor zerkleinert. Die Abtrennung des Feinanteiles, der bei Holz dieser Herkunft zumeist aus Sand und Erdanhaftungen besteht, ist hier bereits durch den verwendeten Apparat in den Zerkleinerungsprozess integriert. Grobe Partikel werden in einem separaten Klassierungsprozess abgetrennt. Anschließend wird die Fraktion mit zerkleinertem Waldrestholz (1.1.1 bis 1.1.3) verschnitten.

(Herkunft: Punkt 1.4: Verschnitt und Gemische)



#### **Qualität X) – Nadelholz-Pellets**

Pellets stellen gegenwärtig die hochwertigste Form biogener Festbrennstoffe dar. Das Ausgangsmaterial für die Pelletierung war hier Nadelholz. Bindemittel wurden bei der Herstellung nicht verwendet. (Herkunft: Punkt 1.2.1.1: Holz ohne Rinde)

Im Rahmen von Felduntersuchungen in den Monaten Februar und März dieses Jahres ergab sich die Gelegenheit, das Emissionsverhalten weiterer Brennstoffqualitäten zu untersuchen. Die Messungen wurden in verschiedenen Holzheizwerken durchgeführt, die der Nahwärmeversorgung von Wohngebieten und öffentlichen Gebäuden dienen.

**Qualität XI) – Waldhackschnitzel**

Waldholz, das von einem örtlichen Landwirt angeliefert wird. Grundstoff war offensichtlich Waldholz aus der Pflege (1.1.1) oder Schlagabraum (1.1.3). Das Holz wurde im Rahmen von Pflege- oder Erntemaßnahmen an der Waldstraße vorkonzentriert und seit dem letzten Winter dort in unzerkleinerter Form gelagert. Die Zerkleinerung erfolgte zeitnah zur Lieferung mit einem Mobilhacker.

(Herkunft: Punkt 1.1.1: Vollbäume oder Punkt 1.1.3: Waldrestholz)

**Qualität XII) – Waldhackschnitzel**

Der Brennstoff wurde von einem kommunalen Entsorgungsunternehmen aus Waldrestholz aufbereitet. Nach der Zerkleinerung wurde er im Haufwerk für mehrere Wochen unter Dach gelagert. Weitere Informationen über die Beschaffenheit des Ausgangsmaterials waren nicht zu beschaffen. (Herkunft: Punkt 1.1.3: Waldrestholz)

**Qualität XIII) – Waldhackschnitzel**

Die Qualität wurde in der selben Anlage vorgefunden wie der Brennstoff XII), stammt jedoch von Messungen, die 3 Wochen nach der ersten Untersuchung stattfand. Lieferant war ebenfalls das kommunale Entsorgungsunternehmen. Der Grundstoff sowie die Zerkleinerungsform sind nach Augenschein gleich. (Herkunft: Punkt 1.1.3: Waldrestholz)

**Qualität XIV) – Waldhackschnitzel**

Ähnlich wie die Qualität XI) stammt der Brennstoff von einem örtlichen Landwirt. Die Zerkleinerung erfolgte mit einem Mobilhacker. Augenscheinlich enthält der Brennstoff keine oder allenfalls sehr geringe Rindenanteile

(Herkunft: Punkt 1.1.1: Vollbäume oder Punkt 1.1.3: Waldrestholz)

**Qualität XV) – Sägerestholz**

Die Holzqualität stammt eigentlich nicht aus der Quellengruppe Wald- und Plantagenholz, soll in der vorliegenden Forschungsarbeit aber dennoch berücksichtigt werden. Sie zeigt zum einen die qualitative Gleichwertigkeit von Brennstoffen über die Herkunftskategorisierung des CEN-Normenentwurfes hinweg, zum anderen lassen sich die Zusammenhänge zwischen Brennstoffqualität, Feuerungstechnik und Abgasemissionen (Kapitel 5) verdeutlichen.

(Herkunft: Punkt 1.2.1.2: Holz mit Rinde)

## 2.4 Wirtschaftlich nutzbare Potenziale an Waldholz

Die Menge an holzartiger Biomasse nach der Begriffsdefinition des CEN, die für die thermische Nutzung theoretisch zur Verfügung steht, beziffert sich auf ca. 16 Mio m<sup>3</sup>/a aus der Forstwirtschaft und auf ca. 1 Mio m<sup>3</sup>/a aus der Landschaftspflege. Diese Mengen werden als technisches Potenzial bezeichnet [5].

Welcher Anteil davon wirtschaftlich sinnvoll zu nutzen ist, hängt von einer Reihe von Einflussfaktoren ab: Die örtlich anfallenden Mengen sind zu den Absatzmöglichkeiten und zur Länge von Transportwegen in Beziehung zu setzen. Hierbei wird der Zusammenhang zwischen der anfallenden Holzmenge, ihrem Wassergehalt und ihrem Energieinhalt meist unterschätzt. Zwischen einem trockenen und einem feuchten Brennstoff [6] variiert der Heizwert einer Volumeneinheit um den Faktor 3 [7], zieht man den Wassergehalt ins Kalkül, bei dem moderne Feuerungstechnik zufriedenstellende Emissionsergebnisse zeigen, bleibt immerhin noch ein Faktor von 2. Vor diesem Hintergrund ist es also entscheidend für die wirtschaftliche Nutzbarkeit der technischen Potenziale, ob und in welcher Form Waldholzreststoffe eine Aufbereitung und somit eine Wertsteigerung erfahren.

Während physikalische Eigenschaften des Holzes seinen Nutzwert als Brennstoff bestimmen, hängt die wirtschaftliche Rentabilität ihrer Produktion vom Aufwand ab, der zu ihrer Bereitstellung zu betreiben ist. Hierbei sind die beiden Quellen Forstwirtschaft und Landschaftspflege getrennt zu bewerten.

Landschaftspflegeholz von Obstplantagen und aus der Pflege von privaten Gärten und öffentlichen Grünanlagen muss in der Regel zunächst vom Ort ihres Entstehens entsorgt werden und fällt somit konzentriert an einem Ort an. Restholz aus dem Obstbau wird nach dem Rückschnitt der Bäume eingesammelt, um die Plantage für die Pflege und Ernte mit Maschinen befahrbar zu halten, Holzreste aus Gärten und Parks werden nach Rückschnittmaßnahmen schon aus ästhetischen Gründen eingesammelt. Die *Bereitstellungskosten* für Brennstoffe aus dieser Quelle reduzieren sich also auf die Zerkleinerung und den Abtransport und sind entsprechend günstig. Gleiches gilt für Straßenbegleitgrün, das bei der Pflege von Rand- und Mittelstreifen von Autobahnen, Bundes- und Landesstraßen zum Großteil schon zerkleinert anfällt. Der Einkaufspreis pro Schüttkubikmeter Landschaftspflegeholz lag im Jahr 2002 bei ca. 4 bis 7€50 [1].

In der Forstwirtschaft hängen die Bereitstellungskosten für Waldhackschnitzel im wesentlichen von zwei Einflussfaktoren ab. Unter dem Begriff *Bereitstellungsverfahren* versteht man die forstwirtschaftliche Prozesskette von der Fällung der Bäume über die Aufarbeitung zu sortimentstauglichen Qualitäten bis hin zum Abtransport von Nutzholzqualitäten und der Zerkleinerung des Waldrestholzes. Forstwirtschaftliche Arbeitsverfahren werden nach dem Grad ihrer



Mechanisierung unterschieden. Dieser erstreckt sich von einfacher Land- und Forsttechnik (Motorsäge zum Fällen, Seilschlepper, Rückeraupe oder Pferd zum Vorkonzentrieren von Rund- und Hackholz an der Waldstraße, Anbauhacker, landwirtschaftlicher Anhänger zum Abtransport der Hackschnitzel) bis hin zu aufwendigstem Maschineneinsatz von sogenannten Hackschnitzel-Harvestern zur kombinierten Aufarbeitung von Stammholz in Standardlängen und Hackschnitzeln in einem Arbeitsgang. Die Abbildung 2.2 zeigt beispielhaft die einzelnen Prozessschritte eines teilmechanisierten Arbeitsverfahrens zur Bereitstellung von Waldhackschnitzeln.

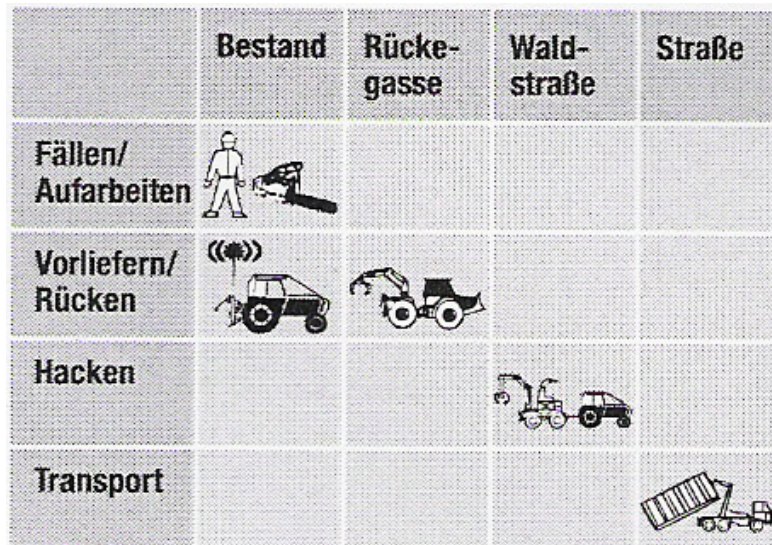


Abbildung 2.2:

Teilmechanisiertes Arbeitsverfahren zur Holzhackschnitzelbereitstellung (Fällen, Aufarbeiten, und Vorliefern im Seillinienverfahren, Rücken, Lagern und Hacken an der Waldstraße Transport mit Container-LKW)

[8]

Die Leistungsfähigkeit solcher Arbeitsverfahren ist um so größer, je höher der Grad der Mechanisierung ist. Allerdings sind hoch mechanisierte Verfahren mit hohen Kostensätzen pro Maschinenarbeitsstunde und für die Arbeitszeit verbunden, woraus sich für die niedrig mechanisierten Verfahren eine günstigere Kostenstruktur ergibt. Die Bayerische Landesanstalt für Wald- und Fortwirtschaft hat die Bereitstellungskosten für das in der Abbildung 2.2 dargestellte Arbeitsverfahren im Experiment untersucht und kommt für einen Brusthöhendurchmesser von 16 cm auf die in der Tabelle 2.4 wiedergegebene Kostenaufteilung für die einzelnen Arbeitsschritte.

Tabelle 2.4: Typische Kostenverteilung bei der teilmechanisierten Bereitstellungskette aus der Abbildung 2.2 [8]

Arbeitsschritt	Kostenanteil
Fällen/Aufarbeiten	10%
Vorliefern/Rücken	24%
Hacken	26%
Transport	40%

Es zeigt sich, dass weit über die Hälfte der anfallenden Bereitstellungskosten auf die Zerkleinerung und den Transport der Waldholzbrennstoffe entfällt.

Weiter hängen die Bereitstellungskosten stark von der Dimension des zu hackenden Materials und vom Massenanteil pro Bestandsflächeneinheit ab. Die Durchforstung liefert höhere Stückmassen, d.h. dickere Äste und dickere junge Bäume als Schlagabraum. Die Arbeitsleistung pro Zeiteinheit ist höher und die Kosten sind somit niedriger. Die Abbildung 2.3 zeigt die Abhängigkeit der Bereitstellungskosten pro Schüttkubikmeter Waldhackschnitzel von der Dimension, angegeben als Brusthöhendurchmesser BDH. Dies ist der Durchmesser eines Baumes in 1,3 m Höhe vom Boden.

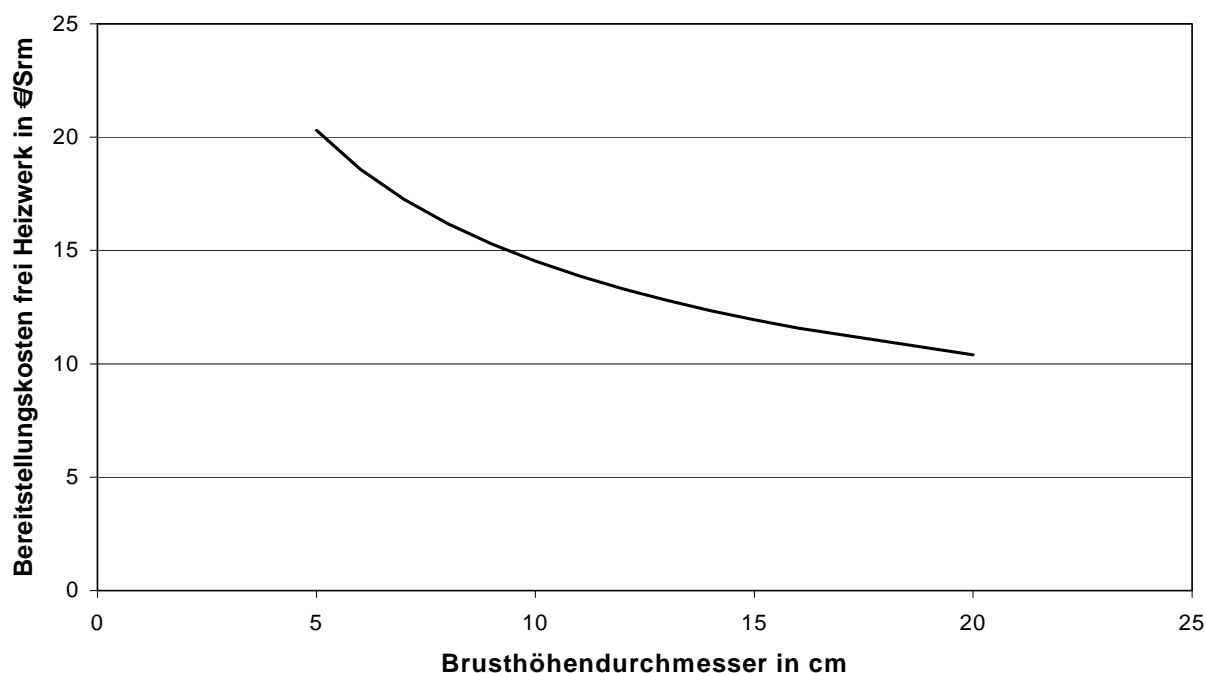


Abbildung 2.3: Bereitstellungskosten für Waldhackschnitzel frei Heizwerk [8]

Auf der Basis dieser Bereitstellungskosten muss im Rahmen einer unter betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten betriebenen Forstwirtschaft zusätzlich ein unternehmerischer Gewinn erzielt werden. Bei einem Durchschnittspreis von ca. 14,5 € pro Schüttraummeter Waldholzhackschnitzel (im Winter 2003/2004) bedeutet dies, dass eine rentable Nutzung von Waldholz erst ab einem Brusthöhendurchmesser von ca. 15 cm möglich ist. Dies hieße, dass große Teile des als technisches Potenzial bezeichneten Waldholzes aus betriebswirtschaftlicher Sicht nicht rentabel vermarktet werden kann, also als wirtschaftlich nutzbares Potenzial unter den gegenwärtigen Energiepreisbedingungen nicht zur Verfügung steht. Diese stark vereinfachte Betrachtungsweise lässt jedoch wichtige Randbedingungen außer acht:

Wirtschaftliche Rentabilitätsbetrachtungen hängen stets unmittelbar mit dem momentan erzielbaren Erlös für ein Produkt ab. Dies gilt im besonderen für den Energiemarkt. Die Preisentwicklung zeigt hier im Laufe der letzten 30 Jahre erhebliche Schwankungen und auch in der Zukunft wird mit stabilen Preisen nicht zu rechnen sein. Gleichzeitig hat die Förderung regenerativer Energiesysteme in den letzten Jahren gerade in Baden-Württemberg zu einer stetig steigenden Anzahl an Holzheizwerken im Leistungsbereich bis ca. 2 MW geführt. Diese Holzfeuerungsanlagen werden fast ausschließlich aus der näheren Umgebung mit Brennstoff versorgt, was örtlich nahezu zur Ausschöpfung des zur Verfügung stehenden Potenzials an Waldholz geführt hat. Solche Heizwerke bilden langfristig sichere Absatzmärkte für Waldholz und damit auch eine gesicherte Einnahmequelle für die Forstwirtschaft, die in den vergangenen Jahren ohnehin unter dem Preisverfall für Industrieholz zu leiden hat.

Die Kostenverteilung in Tabelle 2.4 zeigt zudem Wege zur effizienteren Waldholzhackschnitzel-Bereitstellung sowie zur frühzeitigen Beeinflussung der Brennstoffeigenschaften auf.

Der hohe Anteil an Zerkleinerungs- und Transportkosten legt die logistische Optimierung dieser beiden Arbeitsschritte nahe. So könnten hochmechanisierte Mobilhacker (vgl. Kap. 3.1.) mit Zangenbeschickung mit hohem Auslastungsgrad zur Zerkleinerung von vorkonzentriertem Material eingesetzt werden. Gemeinsam mit einem gut organisierten Transport eröffnen sich so Möglichkeiten der Kostensenkung bei diesen beiden Arbeitsschritten. Vereinzelt wird in dieser Weise vorkonzentriertes Holz bereits heute im Rahmen von Verträgen mit Brennstoffhändlern zerkleinert und zum Abnehmer transportiert. Weiter bietet sich die Möglichkeit, Holz in unzerkleinerter Form über einen Sommer im Wald zu lagern und so einem natürlichen, kostenneutralen Trocknungsprozess zu unterziehen bevor es in der nächsten Heizperiode zerkleinert, an den Abnehmer geliefert und dort mit einem geringeren Wassergehalt und einem höheren Heizwert verbrannt wird. Gegenwärtig findet der Wassergehalt bzw. der damit eng verknüpfte Heizwert von Holzhackschnitzeln im Handel noch nicht genügend Beachtung. Vor diesem Hintergrund wäre statt des Handels mit Hackschnitzelvolumeneinheiten eine energiebezogene Abrechnung wünschenswert.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass eine zuverlässige Abschätzung, wie viel des technischen Waldholzpotenzials auch wirtschaftlich nutzbar gemacht werden kann, äußerst schwierig ist. Vor dem Hintergrund sich schnell ändernder wirtschaftlicher Rahmenbedingungen (z.B. der Variation des Ölpreises) ist ihr Nutzen ohnehin fraglich.



### 3 Brennstoffaufbereitung

Die gezielte Aufbereitung von Waldholz zum biogenen Festbrennstoff ist gegenwärtig nicht Stand der Technik. Neben der Ausformung zu klassischen Brennholzsortimenten werden forstwirtschaftliche Reststoffe, so sie überhaupt zur Verbrennung genutzt werden, meist nur gesammelt und zerkleinert. Als Grund werden wirtschaftliche Überlegungen angeführt. Das trotz der jüngsten Erhöhungen geringe Energiepreisniveau für fossile Energieträger verlangt nach einem konkurrenzfähigen Preis für Holzhackschnitzel. Zerkleinerung und Transport verursachen ebenfalls Kosten, die mit einzukalkulieren sind.

Ähnliches gilt für Holzqualitäten die in der Landschaftspflege anfallen. Landkreise und Städte müssen für dieses Material Entsorgungsmöglichkeiten zur Verfügung stellen. Der vielfach eingeschlagene Weg der Kompostierung hat sich dabei in jüngster Vergangenheit als nicht gangbar erwiesen, da für die großen angefallenen Mengen keine Absetzmöglichkeit besteht.

Soll unter diesen wirtschaftlich engen Rahmenbedingungen eine Aufbereitung und Nutzung als Brennstoff in breitem Maßstab realisiert werden, müssen die Maßnahmen kostengünstig sein und die Versorgungsketten kurz bleiben, um dem Forstwirt und dem Brennstoffanbieter eine gesunde Gewinnmarge zu erhalten.

Aus verfahrenstechnischer Sicht kommen grundsätzlich folgende Aufbereitungsschritte in Frage:

- Die Zerkleinerung,
- die Trocknung zur Reduzierung des Wassergehaltes,
- die Klassierung,
- das Verschneiden verschiedener Chargen (absichtliches Mischen) und eventuell als Schritt hin zu einem veredelten Brennstoff
- die Kompaktierung geeigneter Fraktionen

Im folgenden werden diese Aufbereitungsmethoden kurz beschrieben und auf ihre Eignung zur positiven, kostengünstigen Beeinflussung von Brennstoffeigenschaften hin betrachtet.

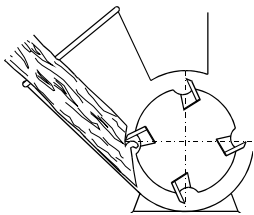
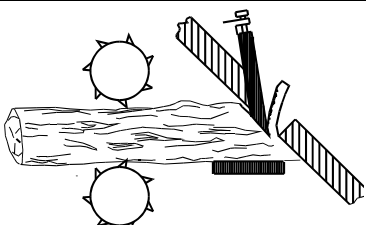
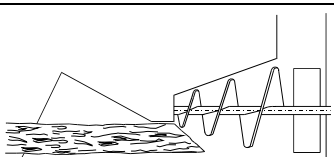
## 3.1 Die Zerkleinerung

### 3.1.1 Hacker

Unter dem Begriff Hacker werden schnell laufende Apparate zusammengefasst, die Holz mit scharfen Werkzeugen zerkleinern. Sie sind als stationäre Anlagen zumeist in der Zellstoff- und der holzverarbeitenden Industrie im Einsatz und werden dort zur Zerkleinerung von Industrieholz als Grundstoff für die Herstellung von Papier und Holzwerkstoffen wie Span- und Faserplatten verwendet. Das Trennprinzip beruht auf der mechanischen Krafteinleitung senkrecht zur Faserrichtung des Holzes. Entsprechend sind Stämme und Äste dem Trennwerkzeug der Länge nach ausgerichtet zuzuführen. Dazu verfügen Hacker zumeist über Zwangszuführungseinrichtungen in Form von Walzen oder Gliederbändern.

Die Tabelle 4 zeigt die gängigen Grundbauformen, den Trommelhacker, den Scheibenrad- und den Schneckenhacker sowie deren wichtigste betriebstechnische Kenndaten.

Tabelle 3.1: Zerkleinerungsprinzipien zur Herstellung von Holzhackschnitzeln [9, 10]

Hackerbauform	Anzahl der Schneidwerkzeuge	Einzugart	max. Holzstärke in mm	Hacklänge in mm	Leistungsbedarf in kW	Durchsatzleistung in m <sup>3</sup> /h
 Trommelhacker	2-ca.20 einzeln oder durchgehend über ges. Trommellänge	Walzen, Stahlgliederbänder	20 – 600	5 – 80 meist einstellbar	45 – ca. 1000	15 – ca. 230
 Scheibenhacker	2 - 4	1 bis 3 Walzen oder ohne Zwangszug	100 – 350	4 – 180 meist einstellbar	8 – 105	2 - 60
 Schneckenhacker	Außenkante	wirkt selbst-einziehend	160 - 270	20 – 80 abhängig von der Schnecke	30 -130	5 - 40

Neben stationären Hackern, die über sehr hohe Durchsatzkapazitäten verfügen werden für die Produktion solcher **Holz hackschnitzel** zur thermischen Nutzung vorwiegend mobile Zerkleinerungsmaschinen eingesetzt. Sie können als *An- und Aufbauhacker* mit kleinerer Leistung an die Zapfwellen von land- und forstwirtschaftlichen Schleppern angeschlossen oder fest auf ein Fahrgestell montiert werden. Sie eignen sich je nach den topografischen Gegebenheiten zum Befahren von Rückegassen und Waldstraßen.



Abbildung 3.1:  
Scheibenradhacker an der Zapfwellen eines Schleppers (im Hintergrund Waldrestholz)

*Anhängehacker* verfügen über einen eigenen Motor zum Antrieb des Hackaggregates, müssen jedoch von Zugmaschinen versetzt werden. Sie sind zum Einsatz auf breiten Waldstraßen oder Holzlagerplätzen gedacht und bewältigen große Durchsatzmengen. *Selbstfahrende Großhacker* bestehen aus dem Zerkleinerungsaggregat und einer Kranbeschickung. Das Hackgut kann entweder in integrierten Behältern zwischengespeichert werden oder es gelangt direkt auf einen Transport-LKW. Diese apparativ kostenintensive und logistisch aufwendige Technik erfordert eine großtechnische Produktion von Hackschnitzeln um rentabel zu sein. Hacker erzeugen aufgrund ihres Zertrennungsprinzips Holz hackschnitzel mit einer, in Abhängigkeit vom Ausgangsmaterial, gleichmäßigen Größenverteilung und einer glatten Oberfläche, Es zeigt in der Regel gute Fließeigenschaften und ist in allen Arten von Brennstoff-Fördereinrichtungen problemlos zu verwenden. Der Nachteil von Hackern zur Zerkleinerung von Waldholz liegt in ihrer Empfindlichkeit gegen Fremdstoffe im Zerkleinerungsgut. Die scharfen Trennwerkzeuge werden durch Steine oder Metallteile leicht beschädigt. Zudem bleiben die Endstücke der Äste und Stämme, sobald die Walzen oder Gliederbänder der Zwangszuführung nicht mehr greifen, oftmals nur

unzulänglich zerkleinert und beeinflussen dadurch die Größenverteilung des Hackgutes ungünstig [9]. Die folgende Abbildung zeigt die Grobfraktion einer Brennstoffcharge, die mit einem Trommelhacker mit Walzeneinzug zerkleinert wurde. Das größte Brennstoffstück unten rechts misst 21,5 cm in der Länge. Am oberen Ende ist die Schnittkante eines Hackermessers sichtbar. Das Endstück dieses Astes gelangte unzerkleinert durch den Hacker.



Abbildung 3.2: Grobfraktion einer Charge zerkleinert mit einem Trommelhacker mit Walzeneinzug. Das größte Brennstoffstück (unten rechts) misst 21,5 cm in der Länge.

### 3.1.2 Schredder

In Schreddern wird Holz nach dem Schlagzerspanungsprinzip zerkleinert. Auf einer schnell laufenden Welle sind starr, beweglich oder kombiniert stumpfe Schlagwerkzeuge angebracht, die das Aufgabegut an einer feststehenden Brechkante oder einem kammartig geformten Gegenwerkzeug zertrümmern. Die Zuführung des Holzes muss nicht wie bei Hackern orientiert erfolgen, sondern es kann dem Apparat in beliebiger Ausrichtung zugeführt werden. Das Produkt, sogenanntes **Schredderholz**, ist von gröberer Struktur als solches aus Hackern. Da die Einleitung der Trennkräfte in Abhängigkeit der Orientierung des Rohmaterials erfolgt, wird das Holz sowohl senkrecht als auch parallel zur Faserrichtung zerkleinert. Im Ergebnis entsteht eine im

Vergleich zu Holzhackschnitzeln gröbere Größenverteilung mit rauer Oberflächenstruktur und schlechteren Fließeigenschaften.

Das Zerkleinerungskonzept stammt aus der Aufbereitung von Mischfraktionen wie sie beispielsweise bei der Abfallentsorgung anfallen. Sein großer Vorteil liegt in der Unempfindlichkeit gegen Fremdstoffe. Diese Methode eignet sich besonders für die Aufbereitung von Landschaftspflegeholz wie es auf kommunalen Sammelplätzen anfällt. Es weist zumeist einen Anteil an Fremdstoffen wie Draht oder anderen Metall- oder Kunststoffteilen auf, die beim Zerkleinern in Hackern Beschädigungen verursachen können. Zur Beschickung können Radlader eingesetzt werden was hohe Durchsatzleistungen realisierbar macht.

Die Nutzbarkeit von Schredderholz wird durch ihre breitere Größenverteilung auf Feuerungen mit Brennstoff-Fördersystemen beschränkt, die unempfindlich gegen größere Brennstoffpartikel sind. Für die Verbrennung in einer Anlage mit Schneckenförderer muss der Brennstoff in der Regel durch Absiebung der Grobanteile aufbereitet werden.



Abbildung 3.3: Vergleich von Holzhackschnitzeln aus einem Trommelhacker (links) mit Schredderholz (rechts)

## 3.2 Die Trocknung

Die Bedeutung des Wassergehaltes von Waldholzbrennstoffen als wichtigem Einflussparameter auf die verbrennungstechnischen Eigenschaft sind seit langem erkannt. Darüber hinaus bestimmt der Wassergehalt aber auch wirtschaftliche Aspekte wie den Heizwert und damit den Energieinhalt, das Risiko des Masseverlustes durch biologische Aktivität von Mikroorganismen, logistische Randbedingungen wie das Schüttgewicht und damit die Transportkosten pro Energieeinheit oder das Gefährdungspotenzial für die Gesundheit durch Pilzwachstum und Sporenbildung.

Maßnahmen zu seiner Senkung waren bisher Ziel einer Reihe von wissenschaftlichen Untersuchungen. Unter **Trocknung** seien in diesem Zusammenhang alle natürlich ablaufenden oder gezielt herbeigeführten Prozesse verstanden, die sich mindernd auf den Wassergehalt auswirken. Aus verfahrenstechnischer Perspektive bietet sich somit eine Gliederung in

- die *Lagerung* an, wo in Abhängigkeit der Lagerbedingungen den Wassergehalt senkende Prozesse ohne technische Eingriffe ablaufen und
- die *aktive Trocknung*, die gekennzeichnet ist durch apparativen oder energetischen Aufwand.

### 3.2.1 Lagerung

Die Lagerung von Waldholzbrennstoffen ergibt sich aus der logistischen Notwendigkeit, den Zeitraum vom Anfall des Waldholzes bei Pflegemaßnahmen oder bei der Holzernte bis zu seiner thermischen Nutzung zu überbrücken. Zunächst erhebt sich dabei die Frage ob das Holz in unzerkleinelter Form gelagert werden soll, beispielsweise indem es im Bestand belassen wird, auf zentrale Sammelplätze gelangt, im Forst eine Teilaufbereitung als Schichtholz erfährt oder ob es im Rahmen mechanisierter Arbeitsverfahren zeitnah zum Einschlag als Hackschnitzelbrennstoff aufbereitet werden soll. In jedem Fall liegt die Entscheidung hierzu bei der Forstwirtschaft.

Die *Lagerung in unzerkleinelter Form* oder als Schichtholz hat in jedem Fall den Vorteil dass das Holz in der Regel über den Zeitraum eines Sommers bis zur nächsten Heizperiode in lockerer Schichtung gut durchlüftet trocknen kann ohne dass weitere Eingriffe Kosten verursachen. Der Wassergehalt sogenannten waldfrischen Holzes, d.h. direkt nach der Ernte- oder Pflegemaßnahme, beläuft sich auf Werte zwischen 50 und 60% bezogen auf die Gesamtmasse feuchten Holzes

Je nach den klimatischen Verhältnissen während des Sommers sinkt er auf 30 bis 45%. Wird das Holz im Sommer gefällt, trocknet es bedingt durch die Abgabe von Wasserdampf über die Blät-



ter schneller. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass der Energieaufwand für die Zerkleinerung trockeneren Holzes ansteigt.

Holzqualitäten aus der Landschaftspflege können, wenn sie auf kommunalen Sammelplätzen anfallen, in der Regel ebenfalls über einen Zeitraum von mehreren Wochen trocknen bevor sie zerkleinert werden.

Die *Lagerung in zerkleinerter Form* wirft zunächst eine Reihe von Problemen auf. Feuchte Holzhackschnitzel mit 40 bis 60% Wassergehalt unterliegen bei sommerlichen Temperaturen mikrobiellen Zersetzungsprozessen die einen Trockenmasseverlust und damit eine Minderung des Energieinhaltes bewirken. Gleichzeitig zieht die biologische Aktivität exotherme Prozesse nach sich, die im Haufwerk Temperaturen bis zu 80°C bewirken den Trocknungsverlauf begünstigen [9]. Weiter verursacht das Wachstum von Schimmelpilzen eine Belastung der Umgebungsluft mit Pilzsporen von denen eine die Gesundheit beeinträchtigende Wirkung, insbesondere für Personen die mit dem Umschlag der Hackschnitzel betraut sind, ausgeht. Ein vor Wettereinflüssen geschützte Lagerung unter Dach begünstigt zwar den Trocknungsprozess, zieht jedoch gleichzeitig eine Erhöhung der Sporenbelastung nach sich. Sogenannte Lagerstabilität erreichen Holzhackschnitzel bei Wassergehalten unterhalb ca. 35%.

### **3.2.2 Aktive Trocknung**

Für die aktive Trocknung von zerkleinertem Holz wurden in den vergangenen Jahren eine ganze Reihe von Ansätzen verfolgt. Ausschlaggebend für deren Rentabilität ist stets die erforderliche Hilfsenergie zur Luftförderung. Eine Erwärmung der Trocknungsluft ist nur dann sinnvoll, wenn Abwärmeströme ausgenutzt werden können. Die Bereitstellung geeigneter Gebäude und von Belüftungstechnik ist kostenintensiv.

Ein entscheidendes Kriterium für das Trocknungsverhalten ist dabei die Größenverteilung der Hackschnitzel. Grobes Hackgut von Schneckenhackern oder von Schreddern trocknet im konvektiv belüfteten Haufwerk schneller als feine Hackschnitzel, da die Schüttung einen geringeren Druckverlust aufweist. Die Abbildung 5 zeigt das Ergebnis systematischer Untersuchungen des Druckverlustes von Hackgutschüttungen verschiedener Korngröße über der Höhe. Eine Halbierung der mittleren Korngröße bedeutet praktisch eine Verdoppelung des Druckverlustes der Schüttung.

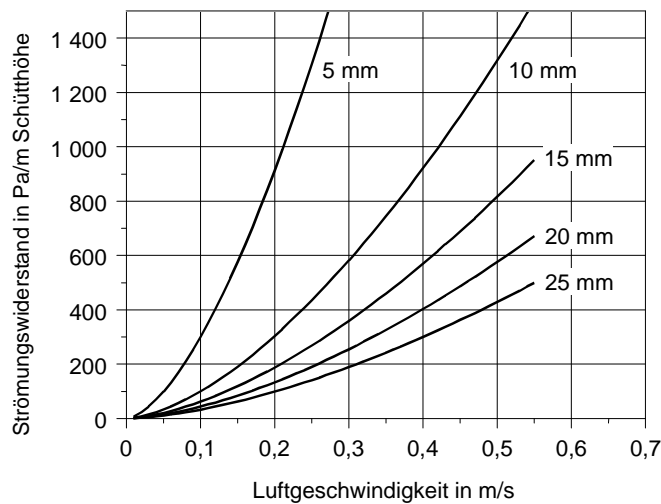


Abbildung 3.4: Druckverlust luftdurchströmter Hackschnitzel-Haufwerke in Abhängigkeit von Strömungsgeschwindigkeit und Größenverteilung des Hackgutes nach [11]

Ergebnisse aus einer dänischen Untersuchung zeigen die Möglichkeiten der saisonalen Lagerung und Trocknung anhand von Hackschnitzeln einheitlicher Größenverteilung. Das Holz wurde nach der Fällung und Zerkleinerung zwischen den Monaten Januar und September im Freien (offen und mit einer Folienabdeckung) und unter Dach (unbelüftet, über Kanäle im Boden belüftet und mit Abwärme aus einer Abgaskondensationsanlage getrocknet) gelagert. Die Abbildung 5 zeigt die Ergebnisse. Eine Lagerung im Freien ohne Witterungsschutz ist während der Sommermonate eine effektive und dabei kostengünstige Methode den Wassergehalt herabzusetzen. Die Lagerung und Trocknung unter Dach ist zwar noch effektiver, jedoch erfordert sie entsprechende Räumlichkeiten (es wurde Getreidelagerboxen mit einer Kapazität von 50 Tonnen bei einer 3 Meter hohen Schüttung verwendet). Außerdem war bei dieser Methode eine drastische Zunahme der Keim- und Sporenbelastung der Luft zu verzeichnen. Die Energieangabe für die aktive Trocknung bezieht sich auf die aufgewendete Wärme (aus einer Abgaskondensationsanlage). Die Abdeckung von Hackguthaufwerken mit Folie zum Schutz vor Witterungseinflüssen behindert die konvektive Abführung von Wasserdampf. Es ist über die gesamte Saison praktisch kein Trocknungseffekt zu verzeichnen.



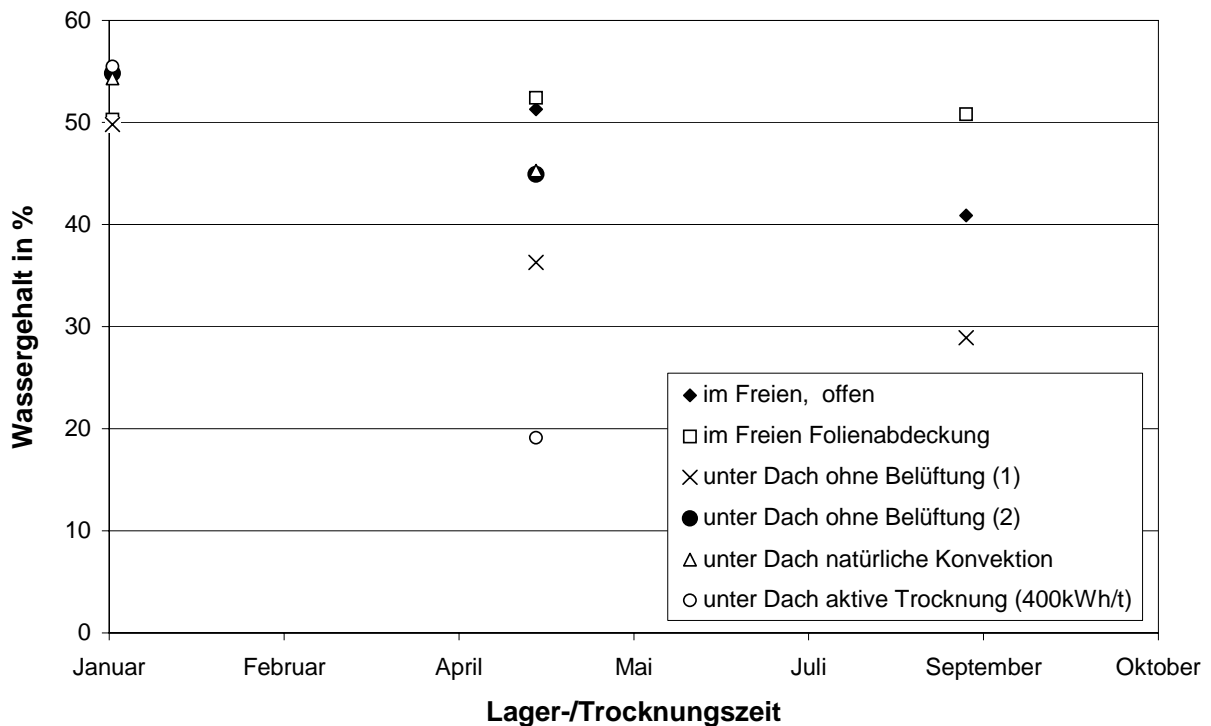


Abbildung 3.5: Einfluss von saisonaler Lagerung und Trocknung auf den Wassergehalt von Hackschnitzeln (5cm) nach [12]

In der Praxis spielen gezielte Trocknungsprozesse im Umgang mit Waldrestholz fast keine Rolle. Eine Reihe von Untersuchungen [12] hat gezeigt, dass auch die Integration in ein Wärmeversorgungssystem, d.h. die Trocknung im Vorratsbehälter der Feuerungsanlage unter Ausnutzung der Abwärme energetisch und apparativ aufwendig und damit letztlich unwirtschaftlich ist. Hinzu kommen eine Reihe sekundärer Probleme wie die mögliche Geruchsbelästigung der Umgebung. Denkbar wäre es, den Trocknungsprozess im Brennstoff-Fördersystem der Feuerungsanlage durchzuführen, wo einerseits mit dem Kesselwasserrücklauf Wärme niedrigen Temperaturniveaus zur Verfügung steht und andererseits der Aufwand durch Gebläse und Hilfsenergie gering bleiben kann.

### 3.3 Die Klassierung

Eine Klassierung zerkleinerter Brennstoffe wird überall dort erforderlich wo die Verbrennungstechnik erhöhte Anforderungen an die physikalische Brennstoffbeschaffenheit stellt. Ein zu hoher Anteil an feinen Partikeln kann ebenso nachteilige Folgen haben wie zu grobe Brennstoffstücke. In der Feinfraktion sammeln sich oftmals Erdanhaftungen, Blatt- und Rindenreste und erhöhen so den Aschegehalt der gesamten Brennstoffcharge. Die Konsequenz ist eine erhöhte Neigung zur Schlackenbildung im Feuerraum. Grobe Brennstoffstücke können einfache Brennstoff-Fördereinrichtungen wie die besonders bei Anlagen kleiner Leistung verbreiteten Schneckenförderer blockieren und zu Betriebsstörungen führen.

Zerkleinerungsmaschinen nach dem Prinzip der Schlagzerspannung, bieten die Möglichkeit, eine Klassierung und damit einen ersten Schritt zu einem aufbereiteten Brennstoff zu vollziehen:

Durch den Einbau eines Siebes mit definierten Lochdurchmessers kann der Feinanteil der zerkleinerten Charge bereits im Schredder abgetrennt werden. Gegenwärtig wird von dieser Möglichkeit nur bei der Aufarbeitung von Landschaftspflegeholz Gebrauch gemacht, wo sich der Anteil an Fremdstoffen (z.B. Sand- und Erdanhaftungen) auf die beschriebene Weise ungünstig auf die Verbrennungseigenschaften auswirkt. Da für die abgetrennte Fraktion keine geeignete Verwendungsmöglichkeit besteht, würde die Klassierung bei den Grundstoffen aus der Forstwirtschaft einen wirtschaftlichen Verlust für den Brennstoffanbieter darstellen. Die Abtrennung von Grob- und Feianteilen eröffnet jedoch ein Reihe positiver Aspekte: Die Größenverteilung der Brennstoffpartikel könnte homogenisiert und somit die Fördereigenschaften des Brennstoffes und das Partikelemissionsverhalten der jeweiligen Feuerungsanlage positiv beeinflusst werden. Weiter verfügt der Feinanteil am Brennstoff über eine verhältnismäßig große Oberfläche, an die ein Teil des Brennstoffwassergehaltes gebunden ist. Seine Abtrennung kann somit einen wichtigen Beitrag zur Vortrocknung des Brennstoffes leisten.

Zur Klassierung von biogenen Festbrennstoffen kann gängige Apparatechnik, sowohl oszillierender als auch rotierender Bauart verwendet werden. In Frage kommen zum Beispiel Trommelsiebe, Plansiebe, Taumel- oder Sternradsiebe. Vor dem Hintergrund der im Kapitel 2 beschriebenen Größenklassen zur Spezifizierung biogener Festbrennstoffeigenschaften muss jedoch angemerkt werden, dass unterschiedliche Siebapparate und Siebformen auch eine unterschiedliche Trenncharakteristik zeigen, sodass die Ergebnisse von verschiedenen Klassierungsverfahren in der Regel nicht vergleichbar sind. Hierauf ist im Kapitel 4.1.3 noch näher einzugehen.

Die Brennstoffqualität VIII) wurde mit einem Trommelsieb aufbereitet, die Qualität IX) mit einem Sternradsieb

### 3.4 Das Verschneiden

Durch die Mischung verschiedener Brennstoffchargen, also durch die absichtliche Herstellung von *Verschnitt*-Qualitäten, können eine Reihe von positiven Effekten für die Brennstoffqualität erreicht werden. Zusammenfassend können folgende physikalischen und chemischen Brennstoffeigenschaften durch die Mischung beeinflusst werden:

- der Wassergehalt als die wichtigste Eigenschaft die auf diese Weise zu beeinflussen ist. Sie stellt den Haupteinflussfaktor auf die Verbrennungsqualität von Holzfeuerungsanlagen dar.
- Damit verbunden kann man den Heizwert und damit den Energiegehalt von Brennstoffchargen positiv beeinflussen.
- Der Ascheanteil des Brennstoffes kann gemindert werden, was vor allem bei Brennstoffen aus der Landschaftspflege notwendig sein kann, wenn sie hohen Anteile an Fremdstoffen in Form von Erd- und Sandanhaftungen enthalten und schließlich
- der Stickstoffanteil des Brennstoffes als bestimmende Größe für die Emissionen an Stickstoffoxiden, sofern die Feuerung nicht über primäre Minderungseinrichtungen (Abgasrezirkulation) verfügt.

Die Herstellung von Verschnittqualitäten ist gegenwärtig nicht Stand der Technik und wird erst vereinzelt praktiziert. Sie stellt jedoch ein wichtiges Aufbereitungsverfahren zur Nutzbarmachung geringwertiger Brennstoffsortimente dar. So können beispielsweise Landschaftspflegehölzer aus der Pflege von privaten Gärten und öffentlichen Grünanlagen in städtischen Gebieten nach der Zerkleinerung und der Abtrennung von Fremdstoffen durch eine Klassierung, mit höherwertigem Waldrestholz gemischt werden. Dies mindert einerseits den meist hohen Aschegehalt des Landschaftspflegeholzes und senkt andererseits den höheren Wassergehalt der Waldrestholzqualität. Weiter können bisher wenig genutzte Qualitäten wie stark wasserhaltige Rindenbrennstoffe der thermischen Nutzung zugänglich gemacht werden.

Die Herstellung von Verschnittqualitäten kann in der Praxis auf einfachste Weise mit einem Radlader oder einem landwirtschaftlichen Schleppe mit Schaufelvorsatz erfolgen. Selbst das Mischungsverhältnis kann auf diese Weise bestimmt werden.

### 3.5 Die Kompaktierung

Die Kompaktierung wird als Verfahren zur Veredelung von Waldholzbrennstoffen seit einigen Jahren zur Pressung von feinkörnig anfallenden Industrieresthölzern wie Sägespane und Schleifstäube in Briketts eingesetzt. Die Herstellung qualitativ hochwertiger Holzpellets wurde in Skandinavien und in den USA auf der Basis von Apparaten aus der Tierfuttermittelproduktion entwickelt.

Feuerungsanlagen, die speziell für die Nutzung dieser Brennstoffqualität konstruiert wurden, sind für den häuslichen Bereich mit einer thermischen Leistungen zwischen 5 und 12 kW seit Mitte der neunziger Jahre auf dem Markt. Pellet-Feuerungsanlagen im höheren Leistungsbereich erleben zur Zeit einen Absatzboom, gleichzeitig wird die Kapazität für die Holzpelletproduktion auf der Basis von Industrierestholz aber auch mit Hackschnitzeln ausgeweitet. Die Pelletproduktion erfordert nach dem gegenwärtigen Stand der Technik einen hohen technisch-apparativen Aufwand. So müssen vorzerkleinerte Grundstoffe mit Hammermühlen und Sichtungsprozessen auf eine eng begrenzte Größenverteilung heruntergebrochen werden. Weiter ist ein definierter Wassergehalt über die Verwendung von Trocknern und die Befeuchtung mit Heißdampf einzustellen. Die Erwärmung bewirkt nach der Theorie eine chemische Aktivierung des Ligninanteils im Holz, der beim eigentlichen Kompaktierungsschritt in Matrizenpressen (Ring- oder Flachmatrizen werden verwendet) zu einer festen Bindung des Materials führt. In der Praxis werden häufig Presshilfs- oder Bindemittel auf der Basis naturbelassener landwirtschaftlicher Produkte wie Stärke oder Melasse eingesetzt. Nach dem Kompaktierungsvorgang ist eine Kühlung des Produktes notwendig. Die Säge- und Spanplattenindustrie hat die Herstellung solcher hochwertigen Holzpellets als zusätzliche Absatzmarkt erkannt und integriert die Produktionslinien in die Herstellungsprozesse von Span- und Faserplatten, so dass auf schwankende Marktpreise mit einer Verlagerung der Produktion zum einen oder anderen Produkt hin reagiert werden kann [13]. Auf diese Weise gelingt es, Holzpellets zu mit Heizöl vergleichbaren Preisen als Energieträger für den häuslichen Bereich anzubieten.

Im Rahmen der Aufbereitung von Waldholzbrennstoffen könnte die Kompaktierung geeigneter Fraktionen eine wirtschaftlich interessante Ergänzung auch für den regional begrenzten Holzbrennstoffmarkt bilden. Eine Produktion in der oben beschriebenen Art und Weise wäre hier aber viel zu aufwendig und zu teuer, jedoch lässt der Feinanteil höherwertiger Holzqualitäten eine ähnlich gute chemische Zusammensetzung erwarten wie das Ausgangsmaterial, beispielsweise von mit Hackern zerkleinertem Stammholz, Vollbäumen oder auch von Waldrestholz (vgl. Tabelle 2.1). Durch eine geeignete Auswahl der Siebdurchmesser könnte bei der Abtrennung des

Feinanteils eine Größenverteilung gewonnen werden, durch die auf die komplizierte und energieaufwendige mechanische Aufbereitung verzichtet werden könnte.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens sollen deshalb aus der Klassierung höherwertiger Grundsortimente Feinanteile gewonnen und mit einer Ringmatrizenpresse die Herstellung von Pellets versucht werden. Aus energetischen sowie aus Kostengründen vermag ein solches Verfahren weder eine zusätzliche aufwendige mechanische Zerkleinerung noch eine aktive Trocknung oder die Zugabe von Presshilfsmitteln darzustellen. Andererseits können jedoch auch auf seiten der Produktqualität Abstriche gemacht werden. Es ist also nicht das Ziel eine der industriellen Produktion gleichwertige hohe DIN oder Ö-Norm-Qualität herzustellen. Vielmehr ist an eine Art Industriepellets gedacht, welche in größeren Anlagen im Geltungsbereich der 1. BImSchV eine Alternative zu den Brennstoffen höheren Wassergehaltes darstellen könnten.

### **3.6      Verfahrensweise zur Optimierung der Brennstoffqualität**

Anhand der oben beschriebenen Aufbereitungsschritte wurde eine Verfahrensweise entwickelt, die einerseits zur Homogenisierung der Brennstoffeigenschaften gegenwärtig genutzter Qualitäten führen soll und andererseits die Möglichkeit zur Erzeugung neuer hochwertiger Brennstoffe eröffnet. Nach der Identifikation und der Klassifizierung von Waldholzbrennstoffqualitäten konzentriert sich der erste Teil des Forschungsvorhabens auf die Untersuchung und Analyse nicht aufbereiteter Brennstoffqualitäten. Im zweiten Teil wurden nach dem dargestellten Schema aufbereitete Brennstoffe auf ihr Verbrennungsverhalten hin untersucht.

Einsatzstoff: Aufbereitungsschritte hochwertige aufbereitete Brennstoffe

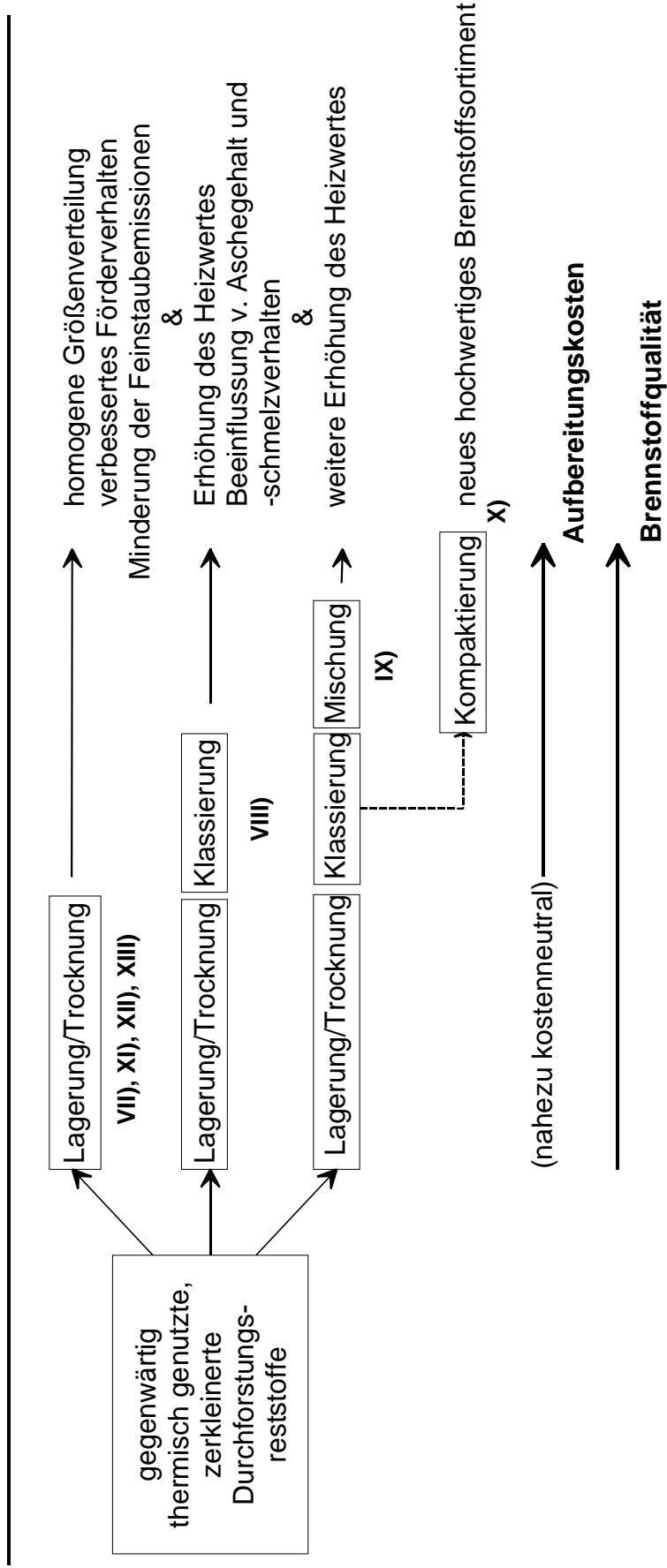


Abbildung 3.6: Vorgehensweise zur Aufbereitung von Waldholz

### 3.7 Energetischer Aufwand und Kosten von Aufbereitungsverfahren

Der energetische Aufwand sowie die apparativen und logistischen Kosten sind ein entscheidendes Kriterium für die wirtschaftliche Rentabilität der voranstehend beschriebenen Aufbereitungsverfahren für Waldholzbrennstoffe. Grundsätzlich gilt hier die gleiche Regel wie für alle Prozessketten. Je mehr Verfahren und Arbeitsschritte sie umfassen, umso kostenintensiver gerät der Gesamtprozess und umso geringer wird die erzielbare Gewinnmarge. Vor diesem Hintergrund muss es stets ein Ziel der Auswahl von Aufbereitungsschritten sein, ihre Anzahl gering zu halten.

Am besten schneiden bei solchen Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen die **Trocknungsverfahren** ab, die auf der saisonalen Lagerung von unzerkleinertem Wald- und Plantagenholz basieren. Sie erfordern keine Investitionen in Anlagen oder zusätzlichen Energieaufwand. Die anfallenden logistischen Kosten für den Transport oder den Arbeitsaufwand verteilen sich auf die Bereitstellungskosten für die nicht aufbereiteten Brennstoffqualität.

Die **aktive Trocknung** ist energetisch und wirtschaftlich nur sinnvoll wenn Abwärme auf einem nutzbaren Temperaturniveau zur Verfügung steht. Weitere Energiekosten entstehen für den Betrieb von Hilfsaggregaten. Ein wichtiger Kostenfaktor ist der erforderliche Transportaufwand zu einer geeigneten Lagerhalle und von dort zum Abnehmer. Hierbei entstehen ebenso wie für den Umschlag zusätzliche Arbeitskosten, die erheblich von den zurückzulegenden Entfernungen abhängen.

Im Falle der **Klassierung** sind zwei verschiedene Aufbereitungsstrategien zu berücksichtigen. Bei der Aufbereitung von Landschaftspflegeholz kann die Absiebung des Feianteils und damit eines Teil des enthaltenen Fremdstoffe bereits mit in den Zerkleinerungsprozess in einem Schredder integriert werden. Dient die Klassierung der Abtrennung von Grobfractionen, erfordert sie neben den Investitionskosten für eine geeignete Anlage ebenfalls Hilfsenergie und ist mit einem erhöhten Transportaufwand zu dieser Anlage verbunden.

Zur Herstellung von **Verschnittqualitäten** ist nur ein Radlader oder ein Ackerschlepper mit Schaufelvorsatz erforderlich, Maschinen die in der Regel zur Verfügung stehen und über den Aufwand zum Umschlag von Waldholzbrennstoffen nicht hinaus gehen. Der Bedarf an zusätzlicher Hilfsenergie ist gering, Transport und zusätzlicher Arbeitsaufwand fallen jedoch an.

Die **Kompaktierung** mit Brikett- oder Pelletpressen ist energetisch und apparativ aufwendig. Wenn sie eine weitere Aufmalung vorzerkleinerter Hackgutqualitäten erfordert, ist ihr Einsatz für einen Kleinbetrieb oder ein kommunales Versorgungsunternehmen, das Waldholzbrennstoffe zur Selbstnutzung aufbereitet, sehr schnell unrentabel. Die Transportkosten bewegen sich im beschriebenen Rahmen, der zusätzliche Arbeitsaufwand kann erheblich sein.

In der Tabelle 3.2 werden, die komparativen Kosten für die beschriebenen Aufbereitungsprozesse aufgelistet. Für die Bewertung wird ein Index verwendet, der die Kosten aufsteigend von 0 bis 4 kennzeichnet.

Tabelle 3.2: Kostenvergleich verschiedener Aufbereitungsprozesse für Waldholzbrennstoffe

Aufbereitungs- verfahren	Energiekosten		Investitionskosten	Transportkosten	Arbeitskosten
	Hilfsenergie	Wärme			
Lagerung unzerkleinert	0	0	0	0	0
Lagerung zerkleinert	2	0	2	3	1
Aktive Trocknung	1	0-5	2	3	1
Klassierung zur Abtrennung des Feinanteils	1	0	3	3	1
Klassierung zur Abtrennung des Grobanteils	2	0	2	3	1
Kompaktierung	5	2	5	3	2-3

Die Bewertung beschränkt sich auf die Betrachtung von Kosten, die durch die Aufbereitungsprozesse zusätzlich zur nicht aufbereiteten Bereitstellung von Waldholzbrennstoffen entstehen. Auf die Bereitstellungskosten wurde im Kapitel 2.4 näher eingegangen.

Die effektivsten und gleichzeitig die kostengünstigsten Aufbereitungsverfahren sind die verschiedenen Methoden der Lagerung zur Reduzierung des Wassergehaltes. Klassierungsverfahren erfordern je nach Zweck entsprechende Sieb- oder Zerkleinerungstechnik, was mit entsprechenden Investitionskosten verbunden ist. Die Kompaktierung ist die kostenintensivste Aufbereitungsmethode.



## **4 Charakterisierung der ausgewählten Brennstoffe**

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden insgesamt 15 Brennstoffqualitäten aus der Quellengruppe Waldholz untersucht. Neben der Ermittlung des Emissionsverhaltens liegt ein Schwerpunkt der wissenschaftlichen Untersuchungen auf der Ermittlung der physikalischen und chemischen Brennstoffeigenschaften und ihrer Korrelation mit den Resultaten der Emissionsmessung. Gleichzeitig sollen die technischen Beschreibungen des CEN-Normenentwurfes auf ihre Eignung und Praktikabilität hin evaluiert werden.

Zu diesem Zweck wurden folgende Analysenverfahren angewendet:

- Bestimmung des Wassergehaltes
- Kalorimetrische Bestimmung des Heizwertes
- Bestimmung der Größenverteilung
- Bestimmung der Schüttdichte
- thermogravimetrische Kurzanalyse nach Flüchtiganteil, Anteil an elementar gebundenem Kohlenstoff und Asche
- Analyse der Elementarzusammensetzung der Hauptbestandteile (C, H, N, S)
- Röntgen-Fluoreszenz-Analyse der Aschezusammensetzung

### **4.1 Physikalische Charakterisierung**

Der Normenentwurf der CEN umfasst unter dem Begriff physikalische Charakterisierung die Bestimmung einer Reihe von Brennstoffeigenschaften. Der Wassergehalt und der Anteil an flüchtigen Bestandteilen und an Asche sind darunter die verbrennungstechnisch bedeutsamsten. Eigenschaften wie die Schüttdichte, die mechanische Abriebfestigkeit von Pellets, die Neigung zur Brückenbildung und der Heizwert sind aus logistischen, betriebswirtschaftlichen und betriebstechnischen Gründen relevant.

#### 4.1.1 Wassergehalt

Der Wassergehalt einer Brennstoffcharge ist die zentrale Einflussgröße auf die Verbrennung. Er bestimmt den Energieinhalt und damit den Energieumsatz der in einer Feuerung erreichbar ist. Auf die aufwendige laboranalytische Bestimmung des Heizwertes kann oftmals verzichtet werden, wenn er bekannt ist. Weiter beeinflusst der Wassergehalt entscheidend die Teillastregelbarkeit und das Emissionsverhalten.

Seine Bestimmung wird in der Regel in Anlehnung an das sogenannten Trockenschrankverfahren [14] vorgenommen, an dem sich auch die Norm des CEN orientiert. Eine Brennstoffprobe wird dabei in nassem Zustand gewogen, in einem Trockenschrank bei ca. 105°C für einige Stunden getrocknet und anschließend erneut gewogen. Die Angabe des Wasseranteils im Brennstoff erfolgt als Wassergehalt  $w$ , bezogen auf den Ausgangszustand des Brennstoffes wobei

$$w = \frac{m_{\text{Brennstoff, trocken}}}{m_{\text{Brennstoff, feucht}}} = \frac{m_{\text{Brennstoff, trocken}}}{(m_{\text{Brennstoff, trocken}} + m_{\text{Wasser}})}$$

oder als Brennstoff-Feuchtigkeit  $u$ , wobei

$$u = \frac{m_{\text{Wasser}}}{m_{\text{Brennstoff, trocken}}}$$

In der Abbildung 4.1 sind die Wassergehalte der untersuchten Brennstoffqualitäten dargestellt, die nach der oben beschriebenen Methode bestimmt wurden. Insgesamt umfassen sie mit Werten von 8% bis 60% die gesamte, in der Praxis vorzufindende und für die Holzverbrennung relevante Spannbreite von sehr trockener Qualität wie den Holzpellets X) bis hin zu extrem wasserhaltigem Material jenseits der Grenze der selbstgängigen Verbrennung [15], das nur deshalb nutzbar ist weil es in geeigneter Feuerungstechnik vorgetrocknet werden kann bevor es zum eigentlichen Verbrennungsprozess kommt. Mit Werten von 30-60% bewegen sich auch die Hackschnitzelbrennstoffe im üblichen Rahmen.

Zur Verdeutlichung des Zusammenhanges mit dem Heizwert sind die analytisch bestimmten Brennwerte  $H_o$  sowie die aus dem Brennwert und dem Wassergehalt berechneten Heizwerte  $H_u$  wiedergegeben.

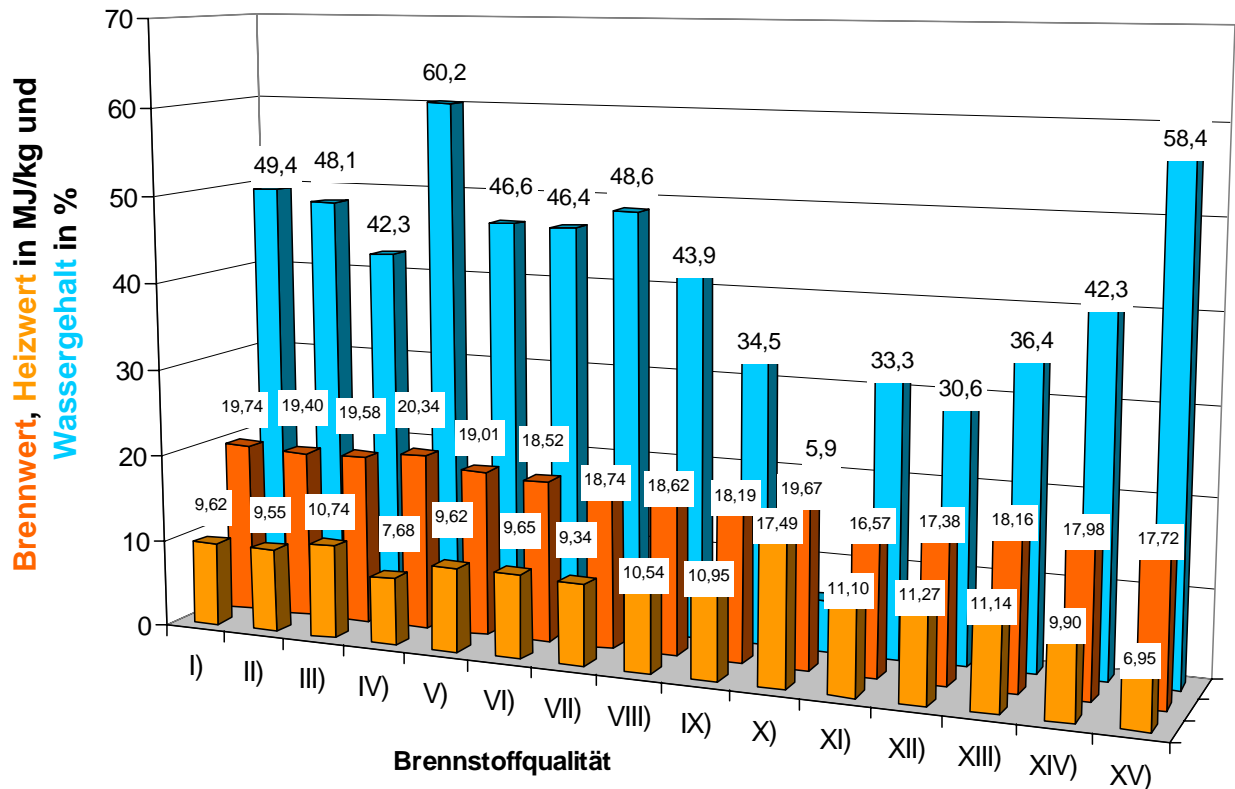


Abbildung 4.1: Wassergehalt, Brennwert und Heizwert der betrachteten Brennstoffqualitäten

#### 4.1.2 Brennwert und Heizwert

Der **Brennwert** kennzeichnet die tatsächlich in einem Brennstoff chemisch gebundene Energie. Die analytische Bestimmung erfolgt mit einer getrockneten, nahezu wasserfreien Probe nach DIN 51708, an die sich auch das CEN-Verfahren anlehnt. Die Probe wird dazu in einer kalorimetrischen Bombe unter Sauerstoffatmosphäre verbrannt. Die freigesetzte Energie erwärmt ein Wasserbad dessen Temperaturanstieg gemessen wird. Mit der Masse des erwärmten Wassers und seiner spezifischen Wärmekapazität lässt sich so der Energiegehalt der Probe bestimmen.

Der **Heizwert** berechnet sich aus dem Brennwert, indem die fühlbare Wärme des enthaltenen Wasserdampfes abgezogen wird. Dieser stammt zum einen aus der Verdampfung des Brennstoff-Wassergehaltes (seine Verdampfungsenthalpie bleibt dabei unberücksichtigt), zum anderen aus der Reaktion des im Brennstoff chemisch gebundenen Wasserstoffes. Diese Vorgehensweise trägt der Tatsache Rechnung, dass bei Verbrennungsprozessen der entstehende Wasserdampf in der Regel durch den Abgaskanal abgeleitet wird ohne seine fühlbare Wärme zu nutzen.

Anhand der Brennstoffqualitäten IV) – Fichtenrinde, X) – Holzpellets und XV) – Sägetestholz ist somit aus der Abbildung XY der Zusammenhang zwischen dem Wassergehalt und dem Heizwert deutlich zu erkennen. Obwohl sich die Brennwerte aller untersuchten Brennstoffqualitäten mit Werten zwischen 18 und 20 MJ/kg auf ähnlichem Niveau bewegen, unterscheiden sich die Heizwerte und damit die tatsächlich nutzbare Brennstoffenergie mit den verschiedenen Wassergehalten. Die analytische Bestimmung des Brennwertes zeigt also, dass die untersuchten Qualitäten energetisch nahezu gleichwertig sind.

### **4.1.3 Korngrößenverteilung von Brennstoffpartikeln**

#### **4.1.3.1 Methoden zur Bestimmung der Korngrößenverteilung**

Die Größe von Brennstoffpartikeln hat Auswirkungen auf eine Reihe von Randbedingungen der thermischen Nutzung von Waldholzbrennstoffen. Sie bestimmt logistisch bedeutsame Charakteristika wie die Schüttdichte und das Verhalten in Brennstofflager- und Fördereinrichtungen ebenso wie verbrennungstechnische Eigenschaften. Die Größenangabe nach dem CEN-Normenentwurf orientiert sich an den im Kapitel 2.1.2 beschriebenen Tabellen über die Detailspezifikation von Haupthandelsformen (vgl. Tabelle 3).

Bei kompaktierten Brennstoffen wie Briketts oder Pellets ist sie durch die Größe der Presswerkzeuge festgelegt, bei Scheitholz wird sie durch das Einkürzen mit der Säge bestimmt. Bei Holzhackschnitzeln und grobem Shredderholz hängt sie hingegen entscheidend von der verwendeten Zerkleinerungstechnik ab (vgl. Kap. 3). Die Partikel sind hierbei nicht einer einzelnen, scharf definierbaren Dimension zuzuordnen, vielmehr entstehen beim Aufbereitungsprozess Brennstoffpartikel unterschiedlicher Größe und Form d. h. die Gesamtheit der Brennstoffpartikel weist stets eine Größenverteilung auf.

Zur Bestimmung der Größenverteilung von Partikelkollektiven bietet die Analysetechnik unterschiedliche Klassierungsverfahren wie die Siebanalyse oder die Sichtung an, die im Rahmen der Normungsarbeit der CEN TC 335 auf ihre Eignung zur Charakterisierung von zerkleinerten Holzbrennstoffen untersucht wurden. Als praktikabelste Methode erwiesen sich die Siebungsverfahren sowohl mit oszillierenden als auch mit rotierenden Apparaten. Letztere zeigen zwar geringere Klassierungsfehler, jedoch sind oszillierende Siebe weiter verbreitet weshalb sie aus

Kostengründen mit in die Norm aufgenommen wurden. Die folgenden Abbildungen verdeutlichen die beiden Klassierungsmethoden.

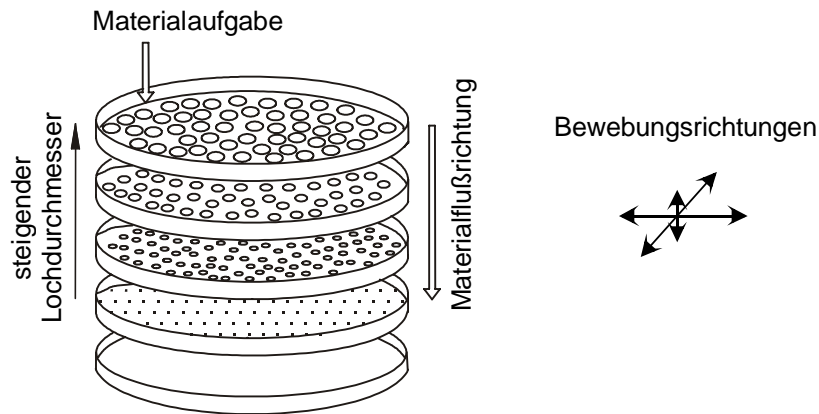


Abbildung 4.2: Klassierung mit oszillierenden Sieben

Die Bewegung oszillierender Apparate erfolgt dabei vorwiegend in der Siebebene. Bewegungen kleiner Amplitude sind auch in der vertikalen Richtung möglich.

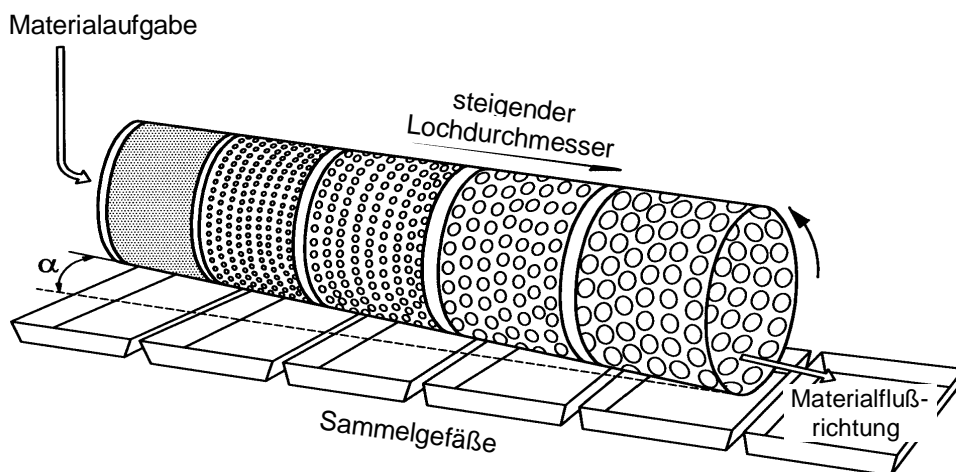


Abbildung 4.3: Klassierung mit rotierenden Sieben

Nach dem Normentwurf „Bestimmung der Partikelgröße biogener Festbrennstoffe“ sind Lochplattensiebe aus Edelstahl mit kreisrunden Löchern zu verwenden. Die Lochgrößen für die Siebe orientieren sich an den Vorgaben des ISO-Standards 3310 – Test sieves. Es sind die Durchmesser 3,15mm, 8mm, 16mm, 45mm und 63mm zu verwenden.

Die Größenverteilung wird bestimmt indem eine hinreichend große Probemenge gesiebt und jede Fraktion auf 0,1g genau abgewogen wird. Brennstoffstücke die größer als 100mm (bezogen auf die größte auftretende Länge) sind, werden zuvor von Hand aussortiert und in zwei Klassen von 100-200mm und >200mm geteilt. Das Ergebnis der Analyse wird in einem Formblatt dokumentiert und die prozentuale Verteilung der Massenfraktionen wird errechnet. Die Angabe der Größenklasse der Brennstoffcharge erfolgt gemäß dem Beispiel in Tabelle 3.

Zur Klassierung der Haupthandelsformen *Sägespäne* und *staubförmige Brennstoffe*, deren Hauptfraktion unter 3,15mm Durchmesser liegt, ist lediglich das oszillierende Klassierungsverfahren zulässig. Es sind dazu Maschensiebe mit den Öffnungsweiten 2,8mm, 2,0mm, 1,4mm, 1,0mm, 0,5mm und 0,25mm zu verwenden.

#### 4.1.3.2 Bestimmung der Korngrößenverteilung der untersuchten Brennstoffe

Zur Bestimmung der Korngrößenverteilung der untersuchten Brennstoffe wurde ein Taumelsieb verwendet welches, ähnlich den rotierenden Siebapparaten, einen kontinuierlichen Klassierungsprozess ermöglicht. Ein exzentrischer Antrieb wirkt auf eine geneigte Rotationsachse und versetzt so das Siebgut, das durch einen Trichter auf die oberste Siebebene gelangt, in eine dreidimensionale Bewegung. Dabei fällt die feinere Fraktion durch die Löcher während die Groben Partikel zum Rand des Siebes transportiert werden. Dort fallen sie durch seitliche Öffnungen in Auffanggefäße. Der Siebapparat verfügt insgesamt nur über 4 Siebe (3,15 bis 45 mm) weil die Ränder der Siebrahmen für die Fraktion über 63 mm Durchmesser zu niedrig sind. Diese Fraktion wurde deshalb ebenfalls von Hand aussortiert. Die Abbildung 5 zeigt den verwendeten Apparat.



Abbildung 4.4: 5-stufiger Taumelsiebapparat zur Bestimmung der Korngrößenverteilung der untersuchten Brennstoffe

Die Tabelle 4 stellt die Ergebnisse der Analysen exemplarisch anhand der Brennstoffqualitäten **VI) Landschaftspflegeholz (Straßenbegleitgrün)**, **VII) Waldrestholz** und **VIII) Waldrestholz (aufbereitet)** dar. Jede der dargestellten Größenverteilungen beruht auf dem Mittelwert aus 3 Siebungsvorgängen mit ein und der selben Brennstoffprobe.

Tabelle 4.1: Größenfraktionen der Brennstoffqualitäten VI) bis VIII)

Brennstoff- qualität	Qualität VI) Landschaftspflegeholz		Qualität VII) Waldrestholz		Qualität VIII) Waldrestholz	
	Masse in kg	Massen- anteil in %	Masse in kg	Massen- anteil in %	Masse in kg	Massen- anteil in %
< 3,15 mm	0,810	12,2	0,760	14,0	0,815	14,1
3,15-8 mm	0,940	14,2	1,010	18,6	1,105	19,1
8-16 mm	1,495	22,6	1,865	34,3	1,825	31,5
16-45 mm	2,955	44,6	1,420	26,1	1,877	32,4
45-63 mm	0,06	0,9	0,090	1,7	0,080	1,4
63-100 mm	0,07	1,1	0,035	0,6	0,070	1,2
100-200 mm	0,215	3,2	0,050	0,9	0,010	0,2
> 200 mm	0,075	1,1	0,210	3,9	0,010	0,2
$\Sigma$	6,620	100,0	5,440	100,0	5,792	100,0

Anhand der Zahlenwerte für die prozentualen Massenanteile der einzelnen Fraktionen kann durch die einfache Aufsummierung eine Größenklassifizierung nach dem CEN-Normenentwurf vorgenommen werden. In den folgenden Abbildungen sind die ermittelten Korngrößenverteilungen grafisch als Histogramme dargestellt:

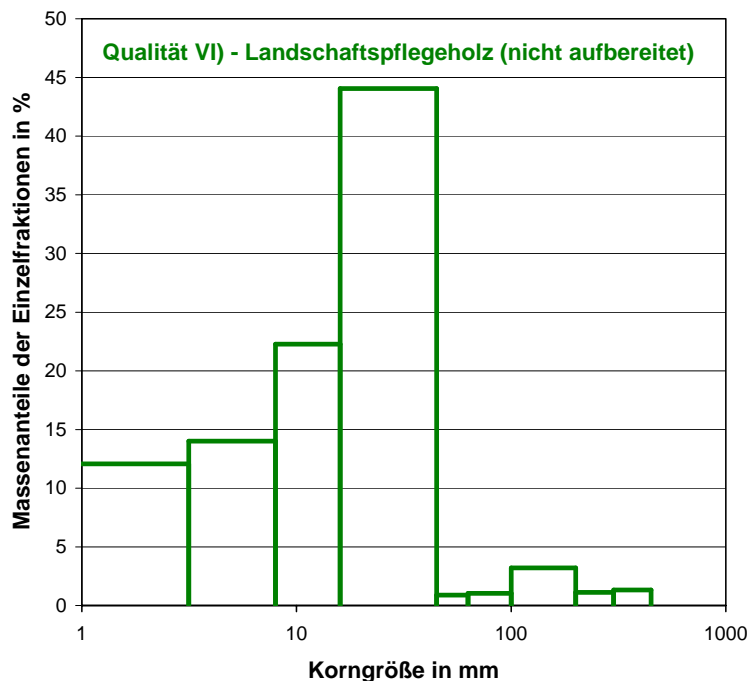


Abbildung 4.5:  
Korngrößenverteilung der Brennstoffqualität VI) -  
Landschaftspflegeholz (Straßen-  
begleitgrün)



Nach den Bewertungskriterien des CEN-Entwurfes für mit einem Schlagrotor zerkleinertes, sogenanntes Shredderholz ist der Brennstoff unter der Größenklasse P45 einzuordnen, d.h. mehr als 80% der Brennstoffcharge weist Partikelgrößen zwischen 3,15mm und 45mm auf. Auffällig ist die insgesamt sehr breite Größenverteilung mit Partikeln bis zu 450mm maximaler Abmessung. Dies bedeutet, dass die größte Länge eines Partikels der Brennstoffcharge aus der die Probe entnommen wurde 450 mm beträgt. Der letzte Balken des Histogramms wird also von den Dimensionen und der Masse des größten Brennstoffstückes bestimmt, das in der gesamten Charge vorzufinden ist.

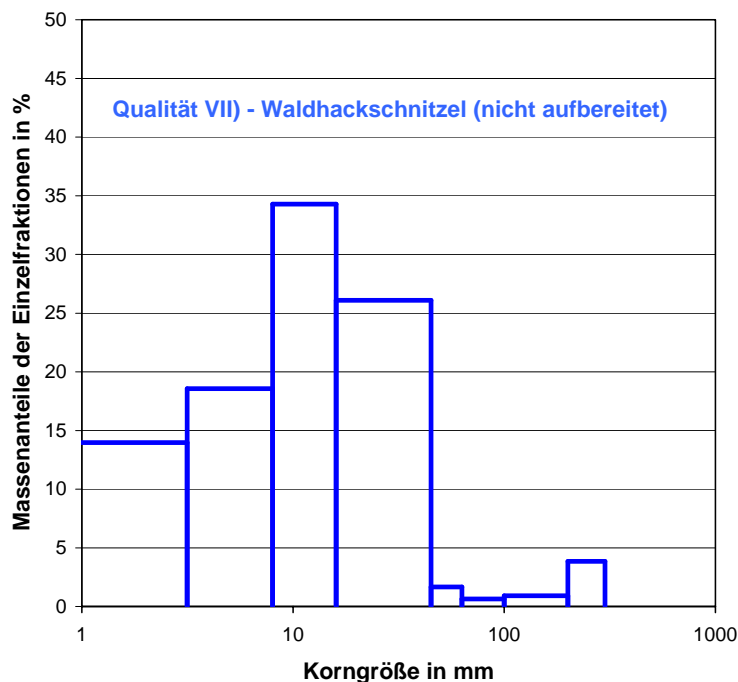


Abbildung 4.6:  
Korngrößenverteilung der Brennstoffqualität VII) –  
Waldhackschnitzel, ohne weitere  
Aufbereitung

Die Brennstoffqualität VII) zeigt im Vergleich zu Qualität VI) eine deutliche Verschiebung hin zu kleineren Partikelabmessungen. Bewertet man die Größenklassen jedoch nach dem Schema des CEN so zeigt sich, dass die Einordnung hier sogar unter der nächst größeren Klasse P63 vorgenommen werden müsste, da die Massenfraktionen zwischen 3,15mm und 45 mm lediglich einen Anteil von 79% ausmachen. Diese Klassifizierung scheint zumindest fragwürdig.

Eine mögliche Ursache hierfür ist der Anteil an Partikeln die kleiner als 3,15 mm sind. Sie bleiben bei der Ermittlung der Hauptfraktion unberücksichtigt. Die Spannweite der Größenverteilung zeigt sich ähnlich wie bei der Qualität VI). Die Größenklasse über 200 mm wird durch ein einzelnes großes Brennstoffstück gebildet.

Die Abbildung 4.7 zeigt das Histogramm der Brennstoffgrößenverteilung der Qualität VIII). Sie stammt aus der gleichen Hackschnitzelcharge wie die voranstehend beschriebenen Qualität, wurde jedoch einem Klassierungsprozess in einem Trommelsieb mit 100 mm Lochdurchmesser unterzogen um große Partikel abzutrennen. Diese Aufbereitungsform trägt den Anforderungen

von Feuerungsanlagen kleiner Leistung an die Brennstoffqualität Rechnung. Kleine Feuerungsanlagen im Leistungsbereich bis ca. 500 kW verfügen als Brennstoff-Fördereinrichtungen zumeist über Schneckenförderer. Große Brennstoffstücke können hier zur Blockierung der Schnecke und damit zu einer Notabschaltung der Anlage führen. Solche Betriebsstörungen verursachen zumeist erhöhte Emissionen.

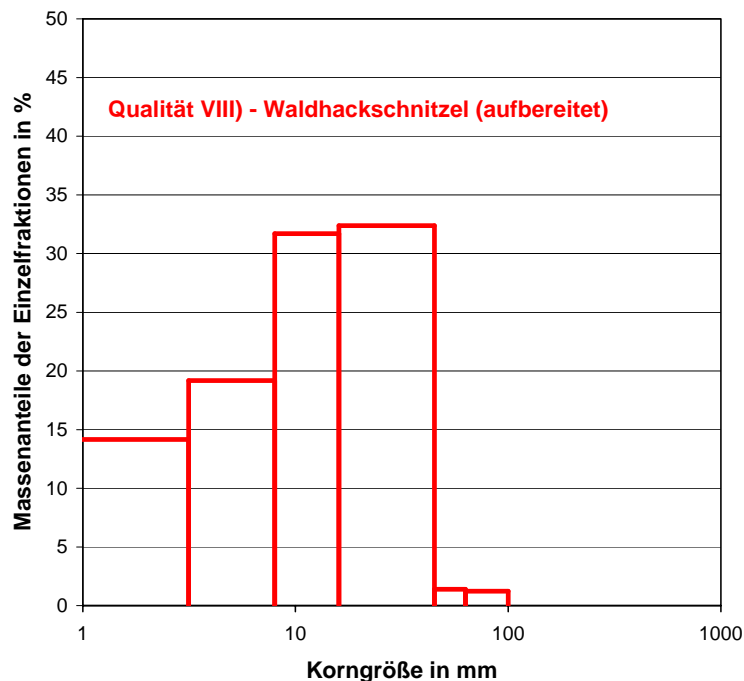


Abbildung 4.7:  
Korngrößenverteilung der Brennstoffqualität VIII) –  
Waldhackschnitzel, Grobanteil  
abgesiebt

Die Abbildung zeigt, dass sich die Anzahl der vorkommenden Größenklassen gegenüber der nicht aufbereiteten Brennstofffraktion verringert hat. Die Klassierung als Maßnahme zur Abtrennung großer Brennstoffpartikel war offensichtlich erfolgreich. Die kleinen Größenklassen < 3,15mm und zwischen 3,15 und 8mm sowie die oberen Klassen (45mm-63 mm und 63-100mm) erscheinen vom Siebungsprozess unbeeinflusst, jedoch zeigen sich Veränderungen in den beiden mittleren Fraktionen. Diese können darauf zurückgeführt werden, dass die Probenahme die tatsächliche Größenverteilung der gesamten Brennstoffchargen nicht exakt wiedergibt.

Die Klassierung von Partikelkollektiven durch Siebe mit kreisrunden Öffnungen führt stets dort zu Fehlern, wo die Teilchen keine kugelförmige Gestalt besitzen. Holzbrennstoffe zeigen, in Abhängigkeit des angewendeten Zerkleinerungsverfahrens, eine eher länglich spanförmige bis rechteckig scheibenförmige Gestalt. Dies führt bei Siebungsprozessen dazu, dass Partikel die Sieblöcher passieren, die gemessen an der größten auftretenden Länge in die nächsthöhere Größenklasse gehören.

Anhand der Größenfraktionen aus der Siebung der drei beschriebenen Brennstoffqualitäten wurde versucht, die Fehler des Klassierungsprozesses zu quantifizieren. Dazu wurde jeder Fraktion eine Teilmenge entnommen und von Hand auf die Klassenzugehörigkeit geprüft. Die Abbildung

9 stellt das Ergebnis dieser Untersuchung dar. Es zeigt sich, dass der Anteil an zu großen Partikeln in einer Größenklasse beträchtlich ist.

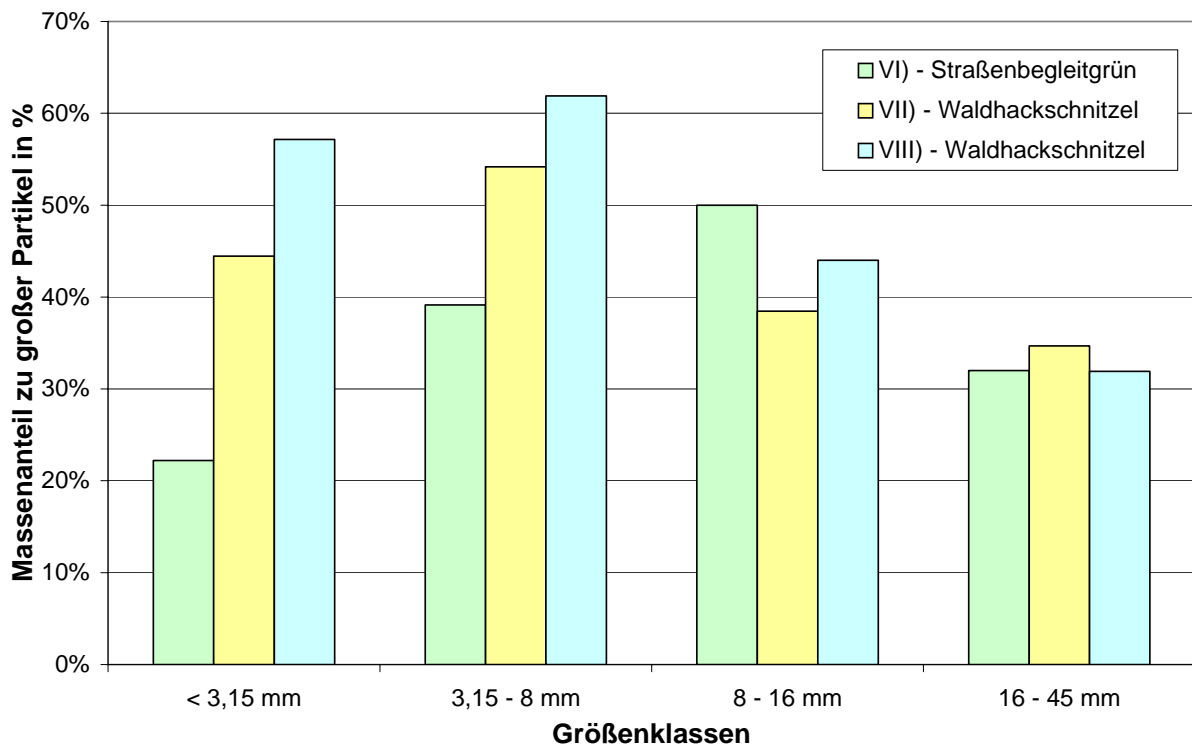


Abbildung 4.8: Massenanteil fehlklassierte Brennstoffpartikel in den einzelnen Größenklassen

Insgesamt bedeutet dies, dass das dargestellte Klassierungsverfahren unter Verwendung eines oszillierenden Siebapparates mit Lochplatten von kreisrunder Gestalt allenfalls bedingt für eine zuverlässige Größenanalyse von Holzhackschnitzeln und Shredderholz geeignet ist.

#### 4.1.4 Schüttdichte

Die Schüttdichte von partikelförmigen biogenen Festbrennstoffen wie Holzhackschnittel, Holzpellets und Shredderholz spielt als Maßeinheit für den Handel sowie für die Planung und Dimensionierung von Brennstoffvorratsbehältern oder Brennstoff-Fördereinrichtungen eine Rolle. Sie ist von der Dichte des Ausgangsmaterials, von der Größenverteilung der Partikel und in besonders hohem Maße vom Wassergehalt abhängig. Verbrennungstechnisch ist sie bei Feuerungsanlagen von Bedeutung, wo die Brennstoff-Fördereinrichtung auf Volumentransportvorgängen beruht. Ein Beispiel für solch eine Fördereinrichtung ist der Schneckenförderer.

Die Bestimmung der Schüttdichte erfolgt denkbar einfach über die Wägung eines mit Brennstoffpartikeln gefüllten Gefäßes bekannten Volumens. Die Abbildung 4.9 zeigt exemplarisch Ergebnisse der Schüttdichtebestimmungen der Brennstoffqualitäten VI) bis VIII). Während die Schüttdichte aller 3 Qualitäten im Anlieferungszustand nur geringe Unterschiede aufweisen, zeigt die erneute Bestimmung nach dem Trocken (auf eine Restfeuchte von wenigen Prozent), dass die Größenverteilung der Brennstoffpartikel und die Dichte großen Einfluss auf diese physikalische Brennstoffeigenschaft haben.

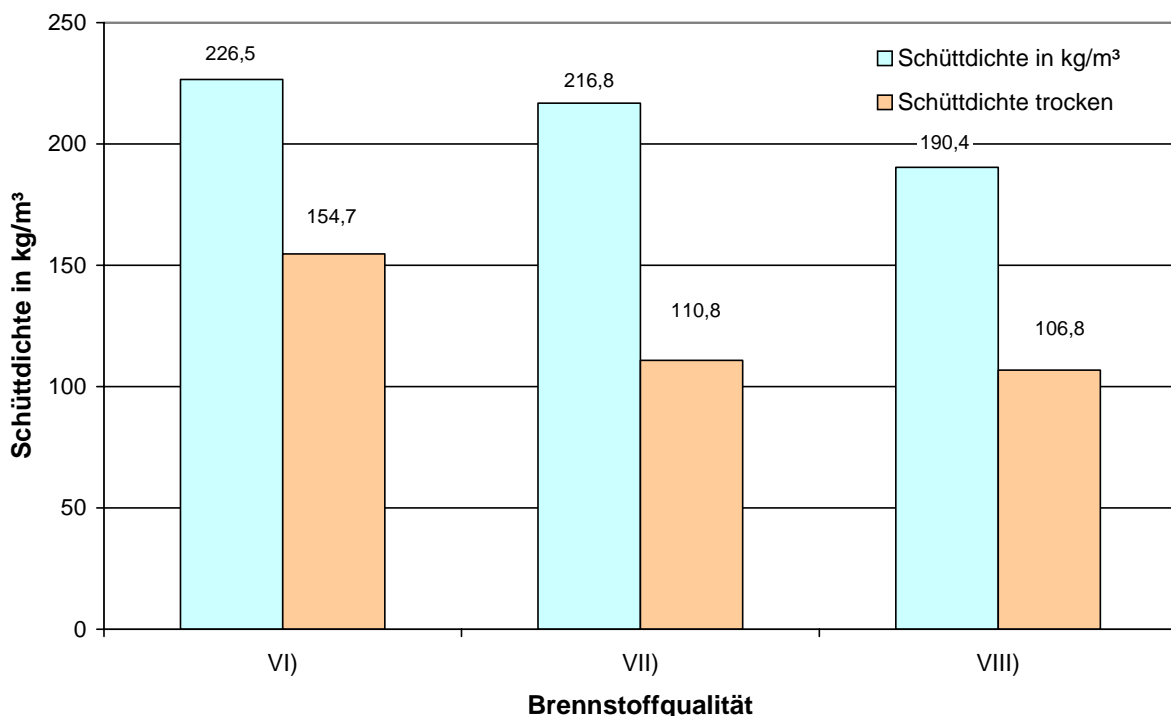


Abbildung 4.9: Schüttdichte von partikelförmigen Brennstoffen im Anlieferungszustand und in trockenem Zustand

## 4.1.5 Bestimmung von flüchtigen Bestandteilen und Aschegehalt – Thermogravimetrische Kurzanalyse

### 4.1.5.1 Bestimmungsmethoden

Der Anteil *flüchtiger Bestandteile* ist ein wichtiges Charakteristikum fester Brennstoffe. Seine Bedeutung ergibt sich aus den physikalischen und chemischen Vorgängen, die bei der Verbrennung ablaufen:

Gelangen feste Brennstoffe in die heiße Umgebung von Feuerräumen, so werden sie erwärmt, was zunächst dazu führt, dass das in der Faserstruktur des Holzes physikalisch gebundene Wasser verdampft. Dieser **Trocknungsphase** schließt sich ab einer Temperatur von ca. 350°C eine heftig ablaufende Entgasungsreaktion, die **thermischen Zersetzung** des Brennstoffes an. Hierbei werden durch die Wärmeeinwirkung chemische Bindungen der Holz-Hauptbestandteile Lignin und Zellulose aufgebrochen. Es entstehen hochkalorische, organische Verbindungen, die in gasförmigem Zustand als „flüchtige Brennstoffbestandteile“ an die Oberfläche des Brennstoffes dringen. Dort reagieren sie in der Gasphase mit dem Sauerstoff der Verbrennungsluft und werden zu Kohlendioxid und Wasserdampf aufoxidiert. Die dabei freigesetzte Strahlungswärme hat wiederum Rückwirkungen auf die Trocknung und die thermische Zersetzung. Zurück bleibt ein Gerüst aus Kohlenstoffatomen (Holzkohle, „elementarer Kohlenstoff“, „fixer Kohlenstoff“) das auf dem Weg der **heterogene Verbrennung** d.h. durch Reaktionen des gasförmigen Luftsauerstoffes an der festen Kohlenstoffoberfläche über die Bildung von Kohlenmonoxid zu CO<sub>2</sub> reagiert.

Die Quantifizierung des Flüchtigenanteils ermöglicht eine Einschätzung des Brennstoffes. Er gibt Auskunft über das Verhalten bei der Zündung, der Vergasung und Flammenbildung und der Verteilung der Wärmeentwicklung auf dem Brennstoffbett und im Feuerraum. Darüber hinaus erleichtert seine Kenntnis die Auswahl geeigneter Feuerungstechnik für eine spezifische Brennstoffqualität und kann so zu einer emissionsarmen Verbrennung beitragen.

Für die analytische Bestimmung des Flüchtigenanteils existieren eine Reihe von Standards (z. B. DIN 51720). Der Vorschlag der CEN-Norm ist eng an deren Vorgehensweise angelehnt:

Eine Brennstoffprobe wird in einem elektrisch beheizten Muffelofen unter Luftabschluss bei 900°C +/- 10°C für 7 Minuten aufgeheizt. Der Flüchtigenanteil errechnet sich aus dem prozentualen Masseverlust der Probe. Der Wassergehalt der Probe ist dabei zu berücksichtigen.

Die Bestimmung des Aschegehaltes beruht auf dem gleichen Verfahren, mit dem Unterschied, dass die Brennstoffprobe in Luftatmosphäre bei einer Temperatur von 550°C +/- 10°C verbrannt wird.

*Aschegehalt* und –Zusammensetzung eines Brennstoffes haben weitreichende Bedeutung für das Betriebs-, das Verbrennungs- und das Emissionsverhalten eines Brennstoffes. Der Aschenanteil von Holzbrennstoffen beträgt ca. 0,5 bis 1 Massenprozent. Ob und wie viel Fremdstoffe in einer Brennstoffcharge enthalten sind lässt sich an dieser Größe auf einfache Weise erkennen. Sein Anteil kann bereits im Brennstoffvorratsbehälter oder im Zuführungssystem zur Feuerungsanlage durch ein erhöht abrasives Verhalten Verschleiß, Beschädigungen und Betriebsstörungen verursachen. Seine Kenntnis ist zur Einschätzung des Brenn- oder Heizwertes hilfreich und erleichtert die Justierung verbrennungstechnischer Parameter wie etwa der Verbrennungsluft bei Rostfeuerungen. Weiter lassen sich von Aschegehalt und Zusammensetzung Brennstoffeigenschaften wie die Neigung zur Feuerraumverschlackung und zur Verschmutzung von Wärmetauscherflächen ableiten, die auf dem Ascheerweichungsverhalten unter Feuerraumatmosphären zurückzuführen sind. Letztlich sollen Zusammenhänge zwischen dem Aschegehalt und dem Partikel-Emissionsverhalten des Brennstoffes im Rahmen des Forschungsvorhabens untersucht werden.

Die Kurz- oder Immediatanalyse, ein Laborverfahren, das für den Sektor der Kohleverbrennung entwickelt wurde, kombiniert die Flüchtigen- und die Aschebestimmung in sinnvoller Art und Weise. Dabei wird eine vorgetrocknete Probe zunächst unter Stickstoff-Atmosphäre auf 106 °C aufgeheizt. Die Temperatur wird bis zu einer Gewichtskonstanz von  $\pm 0,2\%$  gehalten und so der Restwassergehalt der Probe bestimmt. Anschließend wird die Probe auf 900°C aufgeheizt und die Temperatur entsprechend dem voranstehend beschriebenen Verfahren zur Bestimmung des Flüchtigenanteils für 7 Minuten gehalten. Nach der Abkühlung auf 550°C erfolgt ein Wechsel der Atmosphäre. Durch die Zugabe von Luft wird die Probe wiederum bis zur Gewichtskonstanz verbrannt. Die Bestimmung der jeweiligen Massenverluste erfolgt dabei gravimetrisch durch eine in das Analysengerät integrierte Feinwaage (thermogravimetrische Kurzanalyse).

#### 4.1.5.2 Flüchtige Bestandteile und Aschegehalt der untersuchten Brennstoffe

Im Rahmen des Vorhabens wurden die im vorigen Kapitel beschriebenen Brennstoffqualitäten I) bis XV) untersucht. Die Abbildung 10 zeigt die Ergebnisse der thermogravimetrischen Kurzanalysen.

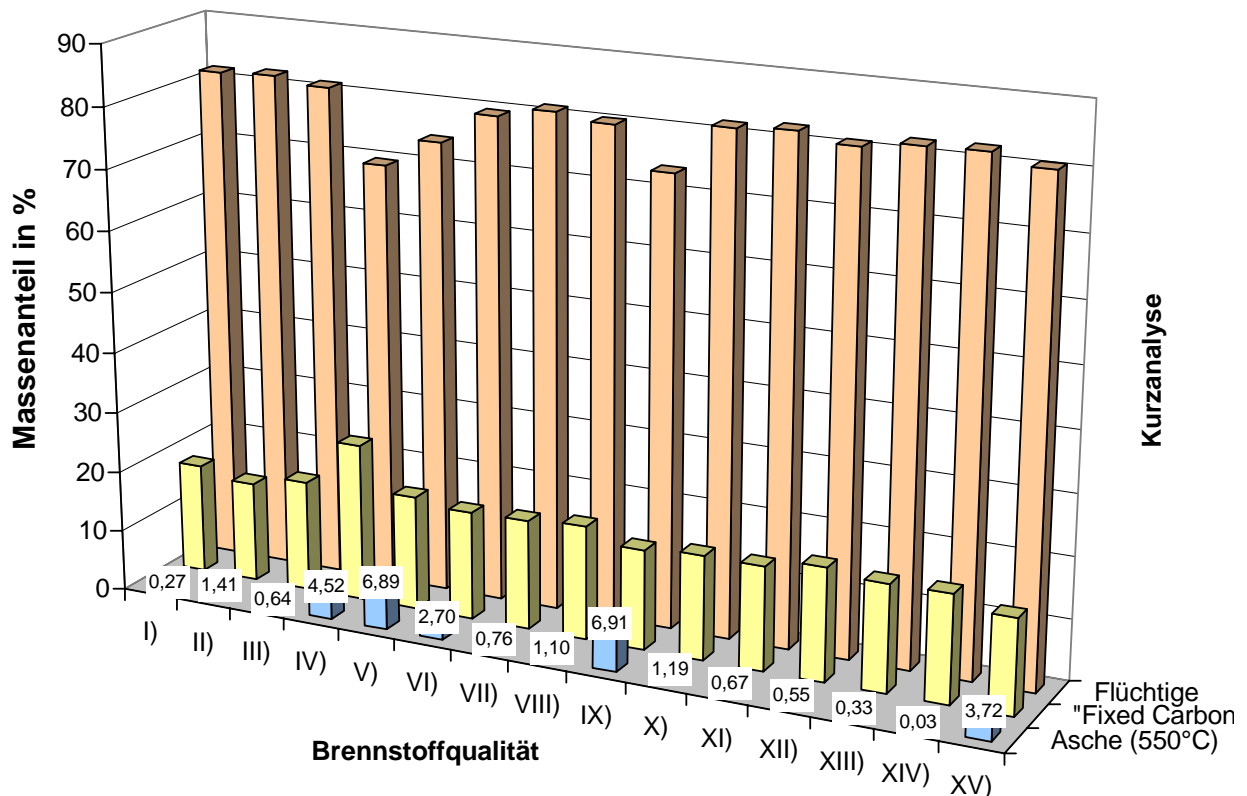


Abbildung 4.10: Flüchtigenanteil und Aschegehalt der untersuchten Brennstoffqualitäten

Der Gehalt an flüchtigen Bestandteilen liegt bei fast allen untersuchten Brennstoffqualitäten auf einem ähnlich hohem Niveau von ca. 80 Massenprozent. Dies deutet auf ein besseres Zündverhalten und eine geringe Neigung zur Feuerraumverschmutzung und –Verschlackung hin. Einen niedrigeren Anteil zeigen lediglich der Rindenbrennstoff IV) und die Qualitäten V), VI) und IX), die aus der Landschaftspflege stammen. Dieses Resultat lässt sich mit dem Aschegehalt der betreffenden Qualitäten korrelieren. Ein erhöhter Gehalt an anorganischen Substanzen geht zu Lasten des Flüchtigenanteils. Der Ascheanteil aus den Landschaftspflegehölzern ist hierbei zum einen auf einen höheren Rindenanteil durch kleine Äste und Zweige zurückzuführen, zum anderen wirken sich hier besonders bei der Qualität V) und IX) Anhaftungen von Erde und anderen Fremdstoffen aus.

Eine weitere Auffälligkeit bildet der erhöhte Gehalt des Rindenbrennstoffes IV) an sogenanntem fixen Kohlenstoff. Ein Vergleich mit den Ergebnissen der Brennwertanalyse in der Abbildung 2 zeigt, dass der höchste Wert hier ebenfalls bei der Rinde festzustellen ist. Der hohe Brennwert erklärt sich also mit dem hohen Gehalt an elementar gebundenem Kohlenstoff.

Der Aschegehalt der Qualität XV) ist untypisch hoch für einen Brennstoff auf der Basis naturbelassenen Holzes. Hier spielt die Vermischung mit Resten von Industrieholz wie z.B. Spanplatten eine Rolle.

## **4.2 Chemische Charakterisierung**

Die chemische Analyse von Brennstoffen hat die Klärung der elementaren Zusammensetzung zu Ziel. Sie besteht im wesentlichen aus der Ermittlung der Anteile der verschiedenen Hauptbestandteile von biogen-fossilen Stoffen wie dem Kohlenstoff, dem Wasserstoff, Stickstoff, Schwefel und dem Sauerstoff. Zur Bestimmung der Aschenzusammensetzung wurde im Rahmen des Vorhabens die Methode der Röntgen-Fluoreszenz-Analyse (RFA) eingesetzt.

Die Kenntnis der elementaren Zusammensetzung von Brennstoffen ermöglicht durch die Quantifizierung von Elementanteilen die Einschätzung von Energieträgern hinsichtlich der entstehenden Oxidationsverbindungen bei der Verbrennung. So ist bei Brennstoffen mit hohem Schwefel- oder Stickstoffgehalt mit der Emission signifikanter Mengen von Schwefel- und Stickstoffoxid-Verbindungen zu rechnen.



### 4.2.1 Die Elementaranalyse

Analytische Methoden zur Bestimmung dieser elementaren Hauptbestandteile sind seit langem standardisiert (z.B. DIN 51721). Ihre Quantifizierung beruht auf der Verbrennung in Sauerstoffatmosphäre wobei Kohlendioxid, Wasserdampf, Schwefeloxide sowie Stickstoffoxide entstehen. Diese gasförmigen Verbindungen werden zum Teil reduziert und anschließend detektiert.

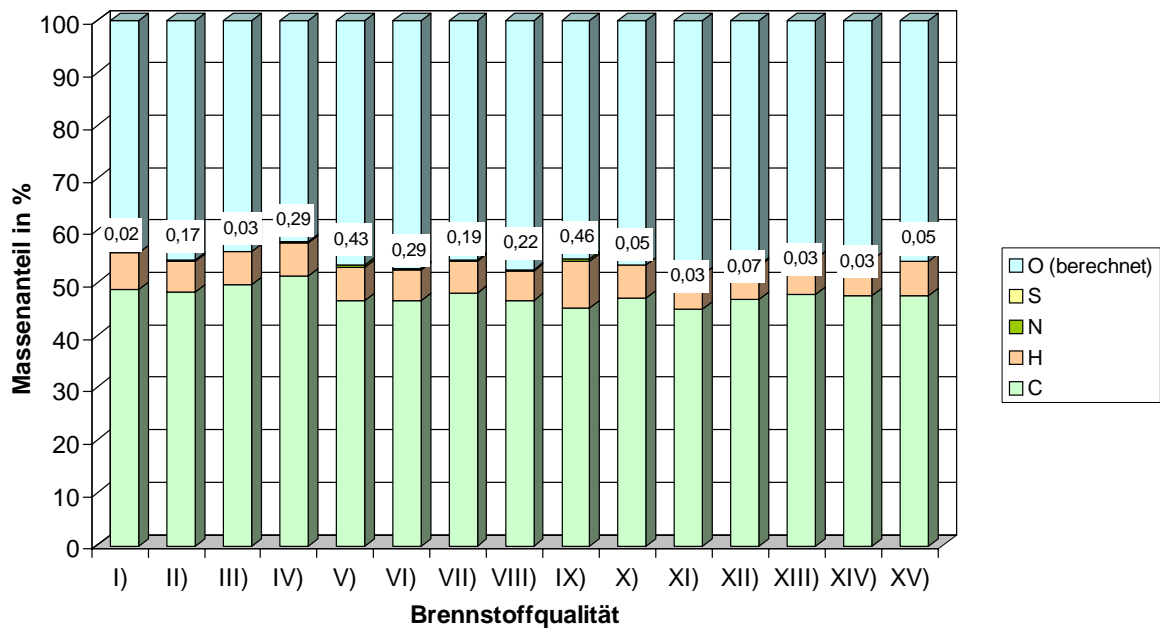


Abbildung 4.11: Ergebnisse der Elementaranalysen (C,H,N,S) der untersuchten Brennstoffe (die zahlenwerte geben den Stickstoffgehalt an)

Die Ergebnisse in der voranstehenden Abbildung sind auf die aschefreie Trockenmasse bezogen. Es zeigt sich dass, die Elementarzusammensetzungen der Brennstoffe sich nur geringfügig unterscheiden. Der Elementgehalt an Kohlenstoff und Wasserstoff bestimmt den Brennwert des Energieträgers, da deren chemische Bindungen die Hauptenergielieferanten bei der Oxidation bilden. Der charakteristische *Kohlenstoffanteil* von Holz beträgt ca. 47 bis 50%. In der Reihe der untersuchten Brennstoffe bilden hier die Rinde sowie die Brennstoffe aus der Landschaftspflege eine Ausnahme. Der hohe Anteil an Kohlenstoff in der Rinde sowie der hohe Gehalt an elementar gebundenem Kohlenstoff nach dem Ergebnis der thermogravimetrischen Kurzanalyse ist mit dem Harzanteil dieses Brennstoffes zu erklären. Dies wird durch den hohen Brennwert  $H_O$  bestätigt. Die Brennstoffe der Landschaftspflege zeigen einen C-Gehalt um 45-47%.

Der *Wasserstoffgehalt* zeigt im Mittel Werte zwischen 5 und 7%. Die Qualität IX) (Mischung aus Landschaftspflegeholz und Waldrestholz) sticht hier mit fast 9% hervor, was allenfalls durch

einen Anteil an artfremden Reststoffen (evtl. Kunststoffverpackungen) erklärt werden kann. Gemeinsam mit dem Wassergehalt des Brennstoffes kann anhand des Wasserstoffgehaltes der Wasserdampfanteil im Abgas, z.B zur Auslegung eines Kondensationssystems berechnet werden.

Die *Stickstoffanteile* bewegen sich insgesamt auf einem niedrigen Niveau. Während die Waldrestholzbrennstoffe Werte unter 0,2 Massenprozent zeigen liegen auch hier die Rinde IV), die Qualitäten aus der Landschaftspflege (V, VI und IX) sowie die Sägerestholzqualität XV) auf einem Niveau zwischen 0,3 und 0,6%. Für die erstgenannten Qualitäten ist dies mit einem erhöhten Anteil biologisch aktiver Materie wie Blätter oder oberflächennahen Rindenschichten zu erklären. Der Stickstoffgehalt des Sägerestholzes ist dagegen vermutlich auf Reste von harnstoffgebundenen Spanplatten zurückzuführen, die sich in der Fraktion befunden haben mögen. Stickstoff wird bei der Verbrennung in Teilen in die Asche eingebunden, der Hauptanteil wird oxidiert. Anhand des Stickstoffgehaltes können also die zu erwartenden Emissionskonzentrationen an Stickstoffoxiden abgeschätzt werden.

Der *Schwefelgehalt* von Holz ist in der Regel sehr gering und lag bei den hier untersuchten Brennstoffen unterhalb der Nachweisgrenze von 0,01 Massenprozent. Gleiches gilt für den Chlorgehalt.

#### 4.2.2 Die Aschenanalyse

Wie im Kapitel 4.1.5 beschrieben beeinflusst die Zusammensetzung des Aschenanteils das Betriebs-, Verbrennungs-, und Emissionsverhalten von Brennstoffen. Hauptbestandteile von Holzaschen sind Silizium, Aluminium, Calcium, Kalium und Magnesium. Schwermetalle wie Chrom Zink, Kupfer sind ebenso wie Natrium, Eisen oder Titan nur in Spuren enthalten.

Zur Analyse wird eine Brennstoffprobe im elektrisch beheizten Muffelofen in Luftatmosphäre bei 550°C verbrannt. Aus dem Rückstand wird ein Probenkörper geformt und mit Hilfe der wellenlängendispersiven Röntgenfluoreszenzanalyse auf seine Zusammensetzung untersucht. Der Probenkörper wird mit Primär-Röntgenstrahlung zur Aussendung von Sekundär-Röntgenstrahlung - der Fluoreszenzstrahlung – angeregt, die spezifisch für die enthaltenen Elemente ist. Eine Kalibrierung mit definierten Standardsubstanzen macht eine Quantifizierung möglich. Die Abbildung 4.12 zeigt die Aschenzusammensetzungen der einzelnen Brennstoffqualitäten

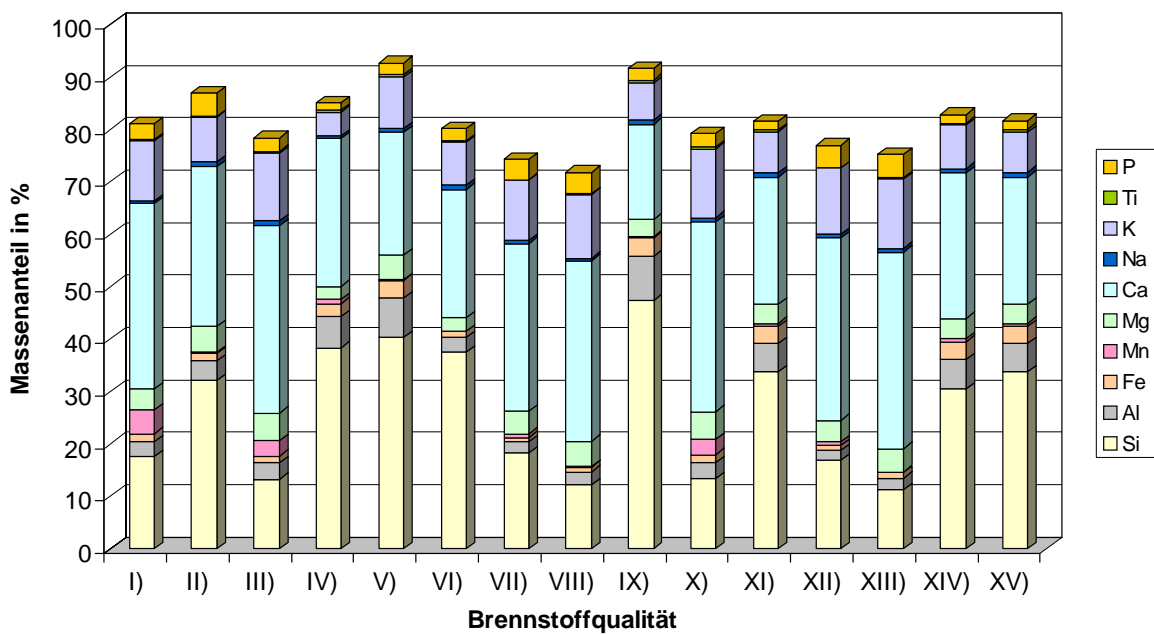


Abbildung 4.12: Ascheanalyse der ausgewählten Durchforstungsreststoffe (Röntgen-Fluoreszenz)

Die Aschezusammensetzungen unterscheiden sich ebenfalls nur wenig. Der hohe Siliziumanteil in den Rinden- und Landschaftspflege-Brennstoffen IV) bis VI) und IX) ist darauf zurückzuführen, dass diesen Sortimenten ein höherer Anteil an Fremdstoffen in Form von Erde oder Sand anhaftet.

## **5 Verbrennungsverhalten von Waldholzbrennstoffen**

### **5.1 Versuchsaubau, Messtechnik und Versuchsparameter**

Die zentrale Fragestellung der vorliegenden Untersuchung ist diejenige nach dem Zusammenhang zwischen der physikalischen und chemischen Beschaffenheit, d.h. nach der Qualität eines Brennstoffes und den Emissionen, die bei seiner Verbrennung entstehen. Die Effizienz der ausgewählten und im Kapitel 3 beschriebenen Aufbereitungsverfahren ist anhand der Emissionen zu bewerten. Die ausgewählten Waldholzbrennstoffe wurden dazu in jeweils mehrtägigen Messkampagnen in Versuchsanlagen des IVD verbrannt und auf ihr Emissionsverhalten hin untersucht.

Die Versuche mit den Brennstoffqualitäten I) bis IX) wurden an einer handelsüblichen Rostfeuerung mit einer thermischen Kesselleistung von 240 Kilowatt durchgeführt. Die Rostfeuerung ist das klassische Verbrennungsprinzip für feste Brennstoffe und eignet sich besonders für Qualitäten mit erhöhtem Wassergehalt (ca. 30 bis maximal 60%). Der Energieträger wird möglichst gleichmäßig auf einem Rost verteilt und von unten mit Primärluft vorgetrocknet und thermisch zersetzt. Über dem Brennstoffbett wird zusätzlich Luft, zum Teil in gestufter Form zugegeben, um hier bei der Verbrennung eine vollständige Oxidation der gasförmigen Brennstoff-Zersetzungsprodukte zu erreichen. Eine räumliche Aufteilung in Primär- und Sekundär-Feuerraum erzwingt eine Umlenkung der Gasströmung, erzeugt Turbulenz und verbessert auf diese Weise die Durchmischung von Zersetzungsgasen und Sekundärluft.

Das Prinzip der IVD-Rostfeuerung und die verwendete Messtechnik ist in der Abbildung 5.1 gezeigt. Die Feuerungsanlage besteht aus einem 3-zügig gestalteten Feuerraum über einem hydraulisch beweglichen Vorschubrost. Die Brennstoffzuführung erfolgt mit Schneckenförderern aus einem kleinen Vorratsbehälter mit Schubbodenaustrag. Die Zugabe von Primärluft erfolgt in zwei getrennt regelbaren Zonen durch die Rostelemente, Sekundärluft kann in insgesamt 3 Stufen in die räumlich abgetrennte Nachverbrennungszone dosiert werden. Dem Rauchrohrkessel ist zur Partikelabscheidung ein sogenannter Multizyklon nachgeschaltet. Er besteht aus insgesamt 6 kleinen Einzelzyklonen, die vom Abgas parallel angeströmt werden. Ein integriertes Saugzuggebläse fördert die Abgase in den Schornstein. Der Feuerraum wird am Ende des Vorschubrostes

automatisch mit einer weiteren Förderschnecke entascht, die Entleerung des Multizyklons erfolgt manuell. Die Versuchsanlage verfügt über zusätzliche Messvorrichtungen zur Erfassung von Primär- und Sekundärverbrennungsluft- sowie des Abgasvolumenstromes.

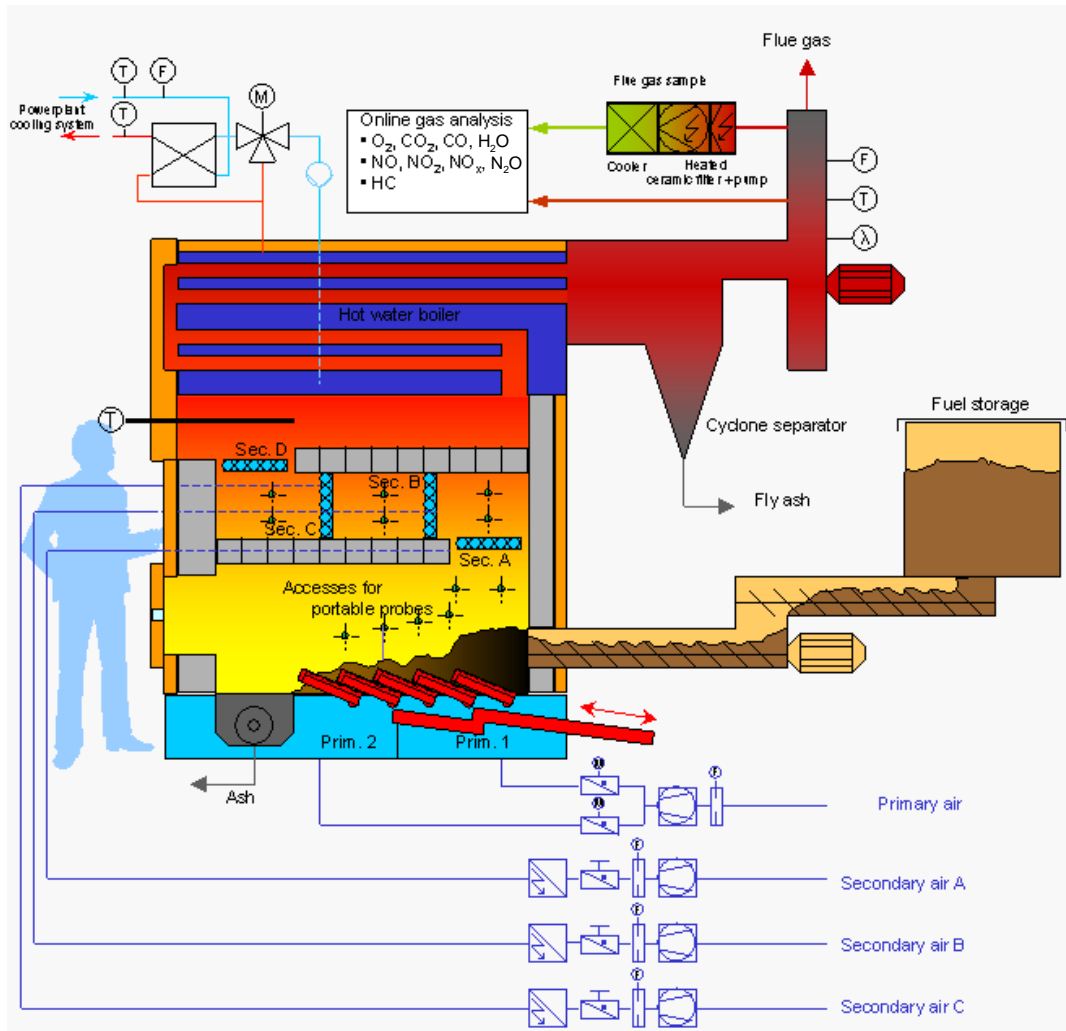


Abbildung 5.1: Rostfeuerungs-Versuchsanlage ROFEA

Die Brennstoffqualität X) Holzpellets wurde an einer Feuerungsanlage untersucht, deren Verbrennungsprinzip sich für trockene Brennstoffe eignet. Die Versuchsanlage besteht aus einer modifiziert Unterschubfeuerung mit einem kleinen Brennstoffrost im Primärfeuerraum. Die Nachverbrennungszone ist ebenfalls räumlich getrennt und wird über ein Gliederkopfgebläse mit Sekundärluft beaufschlagt. Das Gebläse erzeugt eine ausgeprägte Drallströmung in deren Gravitationsfeld sich Staubpartikel abscheiden. Die integrierte Abgasrezirkulation dient der Verbesserung des Ausbrandgrades und der Minderung der Stickstoffoxidemissionen. Die Abbildung 5.2 verdeutlicht die Funktionsweise der Feuerungsanlage.

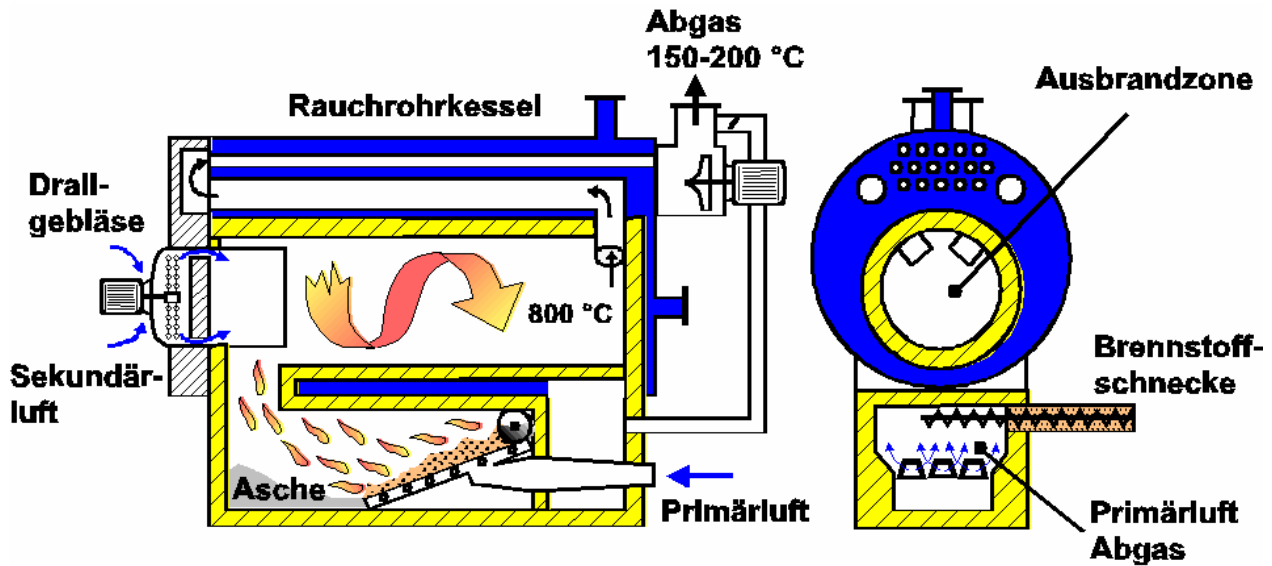


Abbildung 5.2: Modifizierte Unterschubfeuerungs-Versuchsanlage mit integrierter Abgasrezirkulation.

Zur emissionsseitigen Bewertung wurden alle relevanten Abgasbestandteile erfasst. Neben den Hauptoxidationsprodukten von Holzbrennstoffen, Kohlendioxid und Wasserdampf wurde als weiterer wichtiger Abgasbestandteil der Sauerstoffgehalt als Maß für den Luftüberschuss bei der Verbrennung gemessen. Die wichtigsten der luftverunreinigenden Stoffe, die bei der Holzverbrennung auftreten, sind die Produkte unvollständiger Verbrennung. Sie entstehen in Bereichen lokalen Sauerstoffmangels, zu geringer Verbrennungstemperatur, zu kurzer Verweilzeit in Zonen hoher Temperatur oder schlechter Durchmischung von Verbrennungsluft und Brennstoff-Zersetzungsgasen. Hierzu gehören das Kohlenmonoxid  $\text{CO}$  und Kohlenwasserstoffverbindungen  $\text{C}_n\text{H}_m$ , aber auch Ruß- und Teerkondensate als partikelförmige Vertreter dieser Gruppe.

Stickstoffoxide entstehen bei der Verbrennung von Holz aus dem im Brennstoff chemisch gebundenen Stickstoff (vgl. Kap. 4). Mit ihrer Bildung als Nebenprodukte der Verbrennung [16] aus dem Stickstoff der Verbrennungsluft ist nicht zu rechnen, da die Verbrennungstemperaturen für die Reaktionswege der thermischen oder der prompten  $\text{NO}$ -Entstehung zu gering sind [17]. Wie bei allen Verbrennungsvorgängen entstehen Stickstoffoxide auch hier vorwiegend als Stickstoffmonoxid  $\text{NO}$ . Die verwendete Messtechnik ermöglicht jedoch auch die Detektion von  $\text{NO}_x$ . In der Versuchsreihe mit nicht aufbereiteten Brennstoffen wurde auch die Lachgaskonzentration  $\text{N}_2\text{O}$  erfasst.

Als Produkte von Brennstoffverunreinigungen sind im Abgas von Holzfeuerungen Flugasche-  
teilchen enthalten. Gemeinsam mit dem Kohlenmonoxid kommt diesem Schadstoff eine große  
Bedeutung zu, da er auch bei kleinen Anlagen im Geltungsbereich der 1. BImSchV mit einem  
Grenzwert belegt ist. Die den Menschen und die Umwelt schädigenden Wirkungen dieser ver-  
schiedenen Verbrennungsprodukte beruhen auf ihrer Toxizität, ihrer krebserregenden Wirkung  
oder den klimatischen Auswirkungen, die sie in der Atmosphäre hervorrufen.

Die genannten Gaskonzentrationen wurden mit kontinuierlich arbeitenden Abgasanalysatoren  
über die gesamte Dauer der Einzelversuche erfasst:

CO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> O und N <sub>2</sub> O	- infrarotfotometrisch
O <sub>2</sub>	- paramagnetisch
NO, NO <sub>x</sub>	- nach dem Chemilumineszenz-Verfahren
C <sub>n</sub> H <sub>m</sub>	- mit dem Flammenionisationsdetektor

Gase wie CO<sub>2</sub>, CO und O<sub>2</sub>, deren Messverfahren eine Querempfindlichkeit gegen Wasserdampf  
aufweist, werden dazu nach der Absaugung mit einer beheizten Pumpe gefiltert und einem Gas-  
kühler zugeführt, wo der Wasserdampf auskondensiert. Das trockene Abgas gelangt über ein  
Verteilungssystem in die Analysatoren.

Messkomponenten, bei denen eine Kondensation unbedingt vermieden werden muss, werden  
über beheizte Schlauchleitungen abgesaugt. Die Gasaufbereitung ist in der Abbildung 5.1 darge-  
stellt.

Neben den Produkten unvollständiger Verbrennung spielt die Freisetzung von Partikeln bei der  
Verbrennung von Holz aus der Perspektive des Immissionsschutzes die wichtigste Rolle. Ein  
großer Teil des jährlichen Feinpartikeleintrages in die Atmosphäre hat seinen Ursprung in der  
Verbrennung von Holz, wenn auch nicht ausschließlich durch vom Menschen verursachte Pro-  
zesse, sondern überwiegend durch Waldbrände. Eigene Untersuchungen in den vergangenen  
Jahren haben gezeigt, dass die von Holzfeuerungsanlagen emittierten Partikel überwiegend dem  
Feinpartikelbereich mit Durchmessern kleiner 2,5 µm zuzurechnen sind [18].

Die europäische Umweltgesetzgebung trägt diesen Erkenntnissen Rechnung, indem in den letzten  
Jahren Direktiven verabschiedet wurden, die die immissionsseitige Belastung der Luft mit Parti-  
keln reglementieren. Im Zuge dieser Entwicklung geraten Partikelemissionen aus Holzverbren-  
nungsanlagen verstärkt ins Blickfeld von Öffentlichkeit und Gesetzgebung.

Die Erfassung der Partikelemissionen erfolgte als Gesamtstaubkonzentration mit Hilfe von Plan-  
filtermessungen nach VDI 2066 [19]. Zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilung wurde ein

Kaskadenimpaktor verwendet. Beide Verfahren beruhen auf der gravimetrischen Erfassung der Partikelkonzentration. Im Gegensatz zur Messung der gasförmigen Komponenten werden die Partikelemissionen nicht kontinuierlich über die Zeit erfasst, sondern sie können lediglich als Mittelwerte über die Messzeiträume gemessen werden. Die Abbildung 5.3 zeigt den Messaufbau.

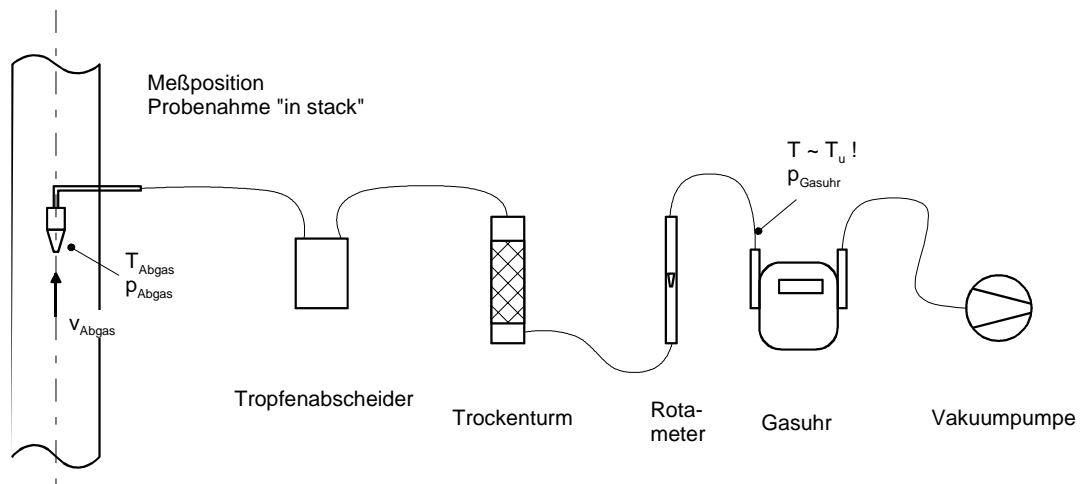


Abbildung 5.3: Gesamtstaub-Probenahme nach VDI 2066

Für die experimentelle Untersuchung des Emissionsverhaltens wurden Versuchsparameter gewählt und variiert, deren Einfluss auf die Verbrennungsqualität eng mit der Qualität des Brennstoffes zusammenhängt.

Der Leistungsbereich, in dem eine Holzfeuerungsanlage betrieben wird, ist für ihr Emissionsverhalten von entscheidender Bedeutung. Die thermische Leistung jeder Feuerungsanlage bemisst sich nach dem erforderlichen Wärmebedarf der angeschlossenen Verbraucher. Ein Ziel der technischen Auslegung der Kombination von Feuerungsanlage und Nahwärmenetz ist es, die Feuerung über möglichst lange Zeiträume bei maximaler Leistung, d.h. an ihrem Auslegungspunkt zu betreiben. Dies ist, obwohl moderne Nahwärme-Versorgungsnetze in der Regel über öl- oder gasbefeuerte Redundanzsysteme zur Abdeckung von Spitzen- und Schwachlastbedarfszeiten verfügen, nicht über eine gesamte Heizperiode möglich. In der Praxis bedeutet dies, dass jeder Holzverbrennungsanlage zeitweise nur ein Teil der möglichen Betriebsleistung abverlangt wird, sie wird also in Teillast betrieben. Eine solche Betriebsweise ist im Falle von Rostfeuerungen im Bereich zwischen 100 und 30% der Auslegungsleistung, der sogenannten Nennlast, sinnvoll möglich. Die experimentellen Untersuchungen wurden deshalb bei Nennleistung, bei zwei Dritteln, bei 50% und bei einem Drittel (33%) der thermischen Kesselleistung von 240 kW durchgeführt. Die Tabelle 5.1 zeigt die Kombination von Leistungsstufen und Brennstoffqualitäten die untersucht wurden.



Tabelle 5.1: Untersuchte Laststufen und Brennstoffqualitäten entsprechend der Auswahl in Kapitel 2

Brennstoffqualität Anlagenleistung <sup>*)</sup>	I)	II)	III)	IV)	V)	VI)	VII)	VIII)	IX)	X)	XI)	XII)	XIII)	XIV)	XV)
100%	X	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x
66%		x				x	x	x	x			x			
50%	X												x		
33%		x				x	x	x	x		x		x		

<sup>\*)</sup>in % der Nennleistung

Die thermische Kesselleistung wurde über den zugeführten Brennstoffmassenstrom variiert. Die Abbildung 5.4 zeigt exemplarisch experimentell ermittelte Brennstoffmassenströme der Qualitäten VI) bis VIII) in Abhängigkeit der Förderschneckendrehzahl. Die thermische Kesselleistung ergibt sich nach Abzug des Abgaswärmeverlustes sowie der Abstrahlungsverluste des Kessels. Sie wurde mit einem Wärmehähler verifiziert.

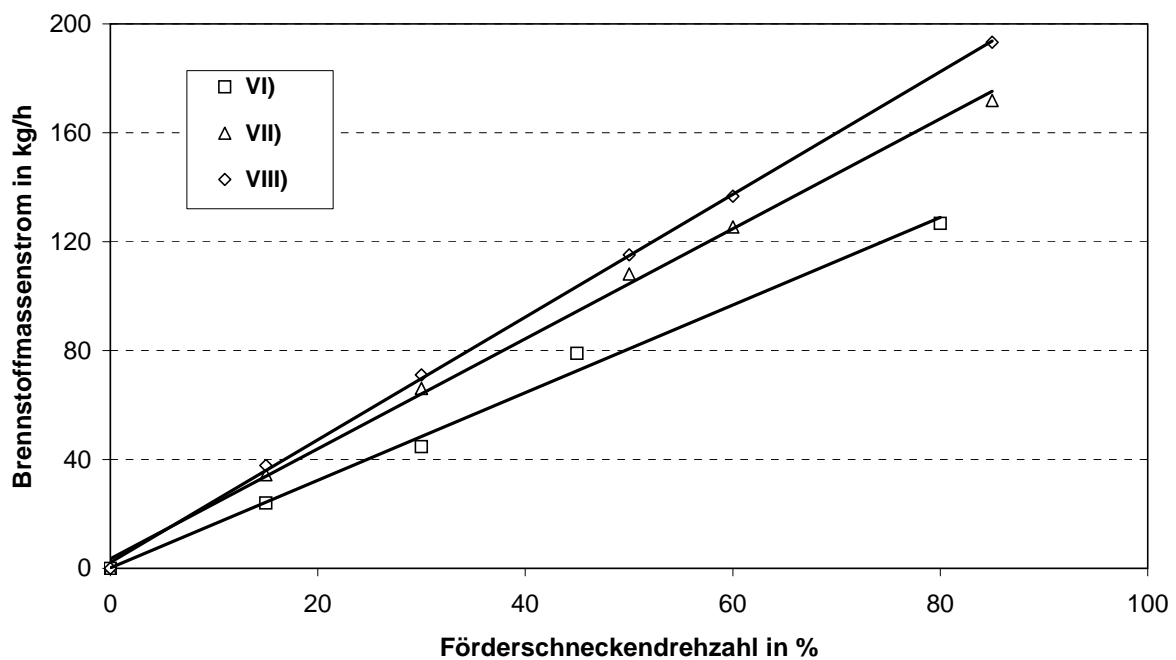


Abbildung 5.4: Brennstoffmassenstrom der Qualitäten VI)-Landschaftspflegeholz, VII) Waldhackschnitzel nicht aufbereitet und VIII)-Waldhackschnitzel aufbereitet in Abhängigkeit der Drehzahl der Brennstoff-Förderschnecke

In einer Versuchsreihe mit der Brennstoffqualität I) wurden die Abhängigkeiten der Emissionskonzentrationen von der Verbrennungsluftstufung betrachtet. Das Hauptaugenmerk lag auf der

Untersuchung der Zusammenhänge zwischen der Primärluftmenge, die dem Brennstoffbett von unten durch den Rost zugeführt wird, und den Gesamtstaubemissionen. Durch diese Versuche sollte geklärt werden, ob auf Entstaubungsanlagen zur Abgasreinigung verzichtet werden kann, wenn die Verbrennungsluftführung auf die verwendete Brennstoffqualität hin optimiert wird. Solche Entstaubungseinrichtungen kommen bei Holzfeuerungsanlagen im Geltungsbereich der 1. BImSchV häufig in Form von Multizyklonen, aber auch als Gewebefilter oder Elektroabscheider zum Einsatz, da die Gesamtstaubemission einem Grenzwert von maximal 0,15 Gramm pro Normkubikmeter Abgas unterworfen ist. Bei Feuerungsanlagen mit einer thermischen Kesselleistung von maximal 1000 kW erhöhen solche Abgasreinigungsanlagen den Investitionsaufwand zum Teil erheblich.

## 5.2 Nicht aufbereitete Brennstoffe

Zur Beurteilung der Qualität von aufbereiteten Brennstoffen ist die genaue Kenntnis des Emissionsverhaltens bei der Verbrennung von nicht aufbereiteten Vergleichsqualitäten notwendig. Deshalb wurden mit den im Kapitel 2 benannten, nicht aufbereiteten Brennstoffqualitäten I) bis VI) am Institut unter definierten Bedingungen Verbrennungsversuche durchgeführt.

Die Abbildung 5.5 zeigt exemplarisch den zeitlichen Konzentrationsverlauf der Hauptverbrennungsprodukte Kohlendioxid  $\text{CO}_2$ , Wasserdampf  $\text{H}_2\text{O}$  sowie des Restsauerstoffgehaltes im Abgas bei der Verbrennung der Brennstoffqualität VI). Die Leistungsstufen von 33%, 66% und von 100% wurden nacheinander eingestellt. Alle übrigen Randparameter der Verbrennung, besonders die Einstellungen von Primär- und Sekundärverbrennungsluft und des Abgasgebläses, blieben unverändert.

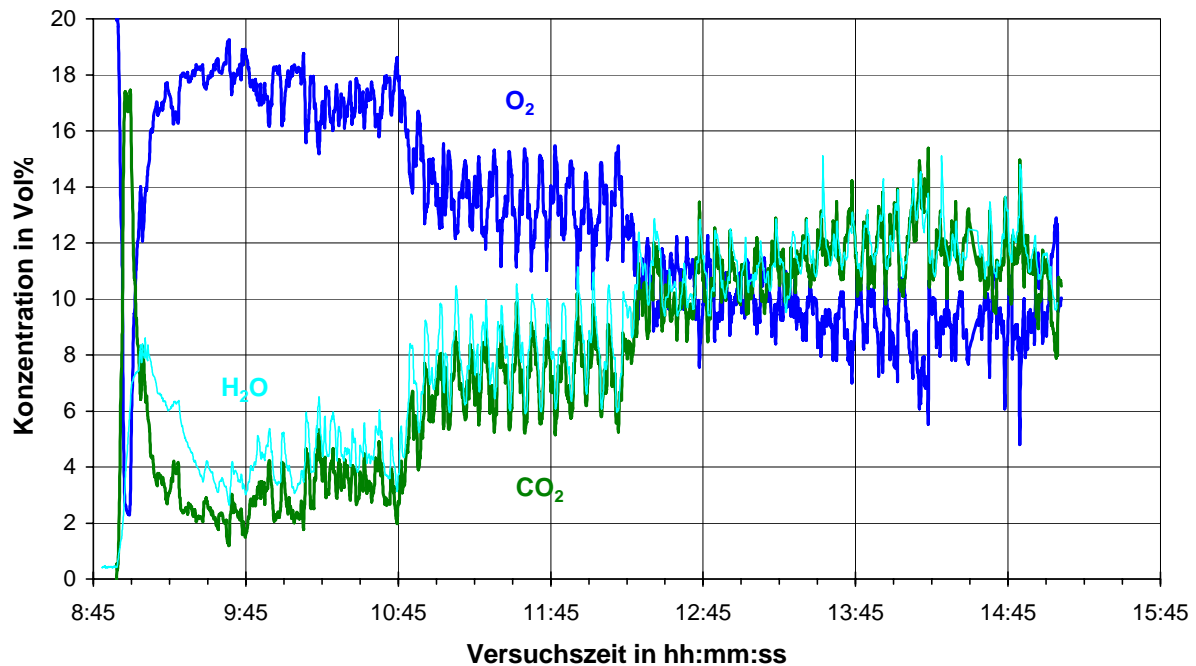


Abbildung 5.5: Zeitliche Konzentrationsverläufe der Hauptverbrennungsprodukte bei der Verbrennung nicht aufbereiteter Qualitäten in der IVD-Rostfeuerung ROFA

Nach der manuellen Zündung mit einer kleinen Menge trockenen Holzes, das zunächst in einer heftigen Verbrennungsreaktion abbrennt, zeigen sich die zu erwartenden Zusammenhänge der Konzentrationsverläufe:

- Das Niveau der Kohlendioxidkonzentration hängt vom Brennstoffumsatz und damit vom zugeführten Brennstoffmassenstrom ab. Die thermische Leistung der Feuerung verhält sich proportional.
- Die Sauerstoffkonzentration verhält sich umgekehrt proportional zur  $\text{CO}_2$ -Konzentration, da die Verbrennungsluft den zur Brennstoffoxidation notwendigen Reaktionspartner liefert.
- Der Verlauf der Wasserdampfkonzentration ist eng an den Verlauf der  $\text{CO}_2$ -Konzentration gekoppelt, da Wasserdampf ebenfalls ein Oxidationsprodukt des Brennstoffes ist. Abweichungen in den Verläufen zeigen sich lediglich zu Beginn des Versuches (ca. 9:00 bis 9:30), wo der feuchte Brennstoff (Wassergehalt  $w=46,4\%$ ) erst vorgetrocknet werden muss, bevor die Verbrennungsreaktion einsetzt.

Auffällig sind die großen zeitlichen Schwankungen der dargestellten Konzentrationen um bis zu 30 Prozent bezogen auf den Konzentrationsmittelwert. Offensichtlich kommen trotz unveränderter Hauptparameter der Feuerungsanlage keine stationären Verbrennungsbedingungen zustande. Zur Verdeutlichung sind in der Abbildung 5.6 die wichtigsten Betriebsparameter, die Verbrennungsluftströme sowie der Abgasvolumenstrom des entsprechenden Versuches wiedergegeben.

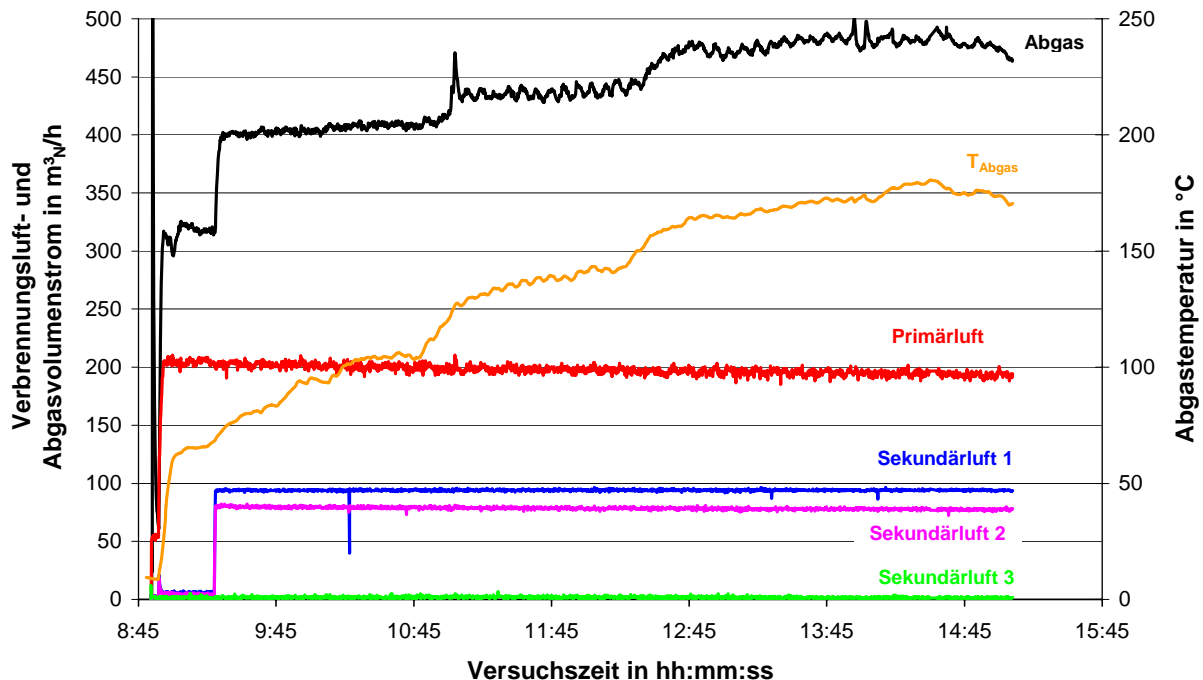


Abbildung 5.6: Betriebsparameter der Rostfeuerungsanlage bei der Untersuchung der Brennstoffqualität VI)

Die Verbrennungsluftströme zeigen eine einheitliche, zeitliche Konstanz. Die Änderung des Abgasvolumenstromes weist Parallelen zum  $\text{CO}_2$ -Verlauf und damit zur Anlagenleistung auf. Sie ist auf die Zunahme der Abgastemperatur mit dem Energieumsatz der Feuerungsanlage zurückzuführen. Als Ursache für die instationäre Verbrennungsreaktion kommen, neben zeitlichen Schwankungen der Brennstoffqualität, die Bewegung des Brennstoffbettes durch den Vorschubrost in betracht. Die Abbildung 5.7 stellt das Zeitintervall dar, während dem die Feuerung mit einer Leistung von 66% betrieben wurde (ca. 10:45 bis 12:15). Es zeigt sich dass sich die Konzentrationsschwankungen mit großer zeitlicher Genauigkeit alle 6 Minuten wiederholen. Sie sind folglich nicht auf Veränderungen der Brennstoffqualität zurückzuführen, diese wären zufällig und kaum reproduzierbar, sondern auf die Bewegungsintervalle des Vorschubrostes.

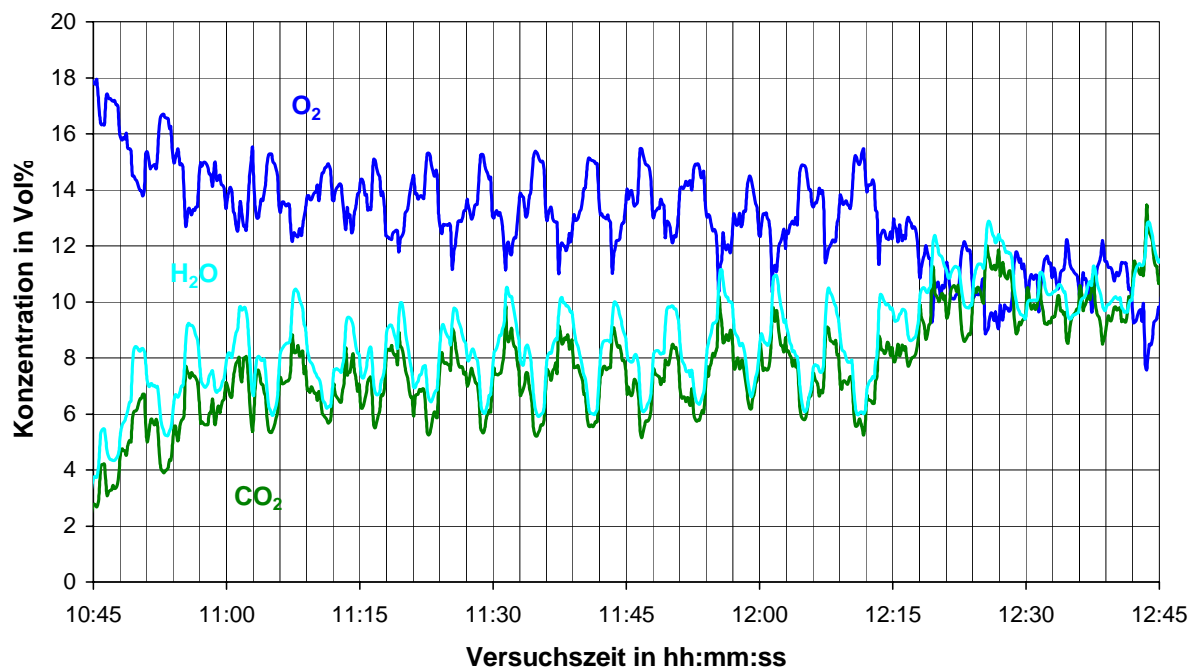


Abbildung 5.7: Ursachen für zeitlich nicht stationäre Verbrennungsbedingungen – Konzentrationsschwankungen im Betrieb mit 66% der Nennleistung

Insgesamt ist seine gewählte Einstellung nicht zufriedenstellend. Sie ließ sich jedoch bei allen an der Rostfeuerung durchgeführter Versuche nicht nennenswert optimieren. Untersuchungen an den Feuerungsanlagen verschiedener Nahwärmeversorgungsnetze (vgl. Kap 5.4) zeigen ähnliche Verhältnisse.

Die zeitlichen Schwankungen der gemessenen Konzentrationen haben weitreichende Auswirkungen auf die Einschätzung des Emissionsverhaltens der untersuchten Brennstoffqualitäten. Zum Vergleich der kontinuierlich erfassten Gaskomponenten mit den Ergebnissen der handana-

lytischen Partikelmessungen die, wie bereits erwähnt, einen Mittelwert über den jeweiligen Messzeitraum darstellen, ist die Methode der arithmetischen Mittelwertbildung statthaft. Dies macht die Quantifizierung der zeitlichen Schwankungen notwendig, wofür sich dann die Angabe der Standardabweichung um den Mittelwert anbietet. Die Standardabweichung darf hier aber nicht als Maß für die Genauigkeit der zugrundeliegenden Messwerte verstanden werden, sondern sie steht für die betragsmäßige Auswirkung der Änderung physikalisch chemischer Randbedingungen der Verbrennung. Zur Bewertung des Emissionsverhaltens sind also die Standardabweichungen der Hauptkomponenten ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_2$ ) mit denjenigen der Luftverunreinigungs-komponenten zu vergleichen. So kann beurteilt werden, wie sich die zeitlichen Änderungen der Verbrennungsbedingungen auf Bildung von luftverunreinigenden Stoffen auswirkten.

Die folgende Abbildung 5.8 zeigt die Konzentrationsverläufe der erfassten luftverunreinigenden Stoffe Kohlenmonoxid, der Kohlenwasserstoffverbindungen sowie der Stickstoffoxide. Es zeigt sich eine ausgeprägte Abhängigkeit vom Lastbereich in dem die Feuerung betrieben wird. Während Produkte unvollständiger Verbrennung wie Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffe besonders im Schwachlastbereich emittiert werden, entstehen Stickstoffoxide vermehrt in Phasen intensiver Verbrennungsreaktion. Erneut fallen die starken Schwankungen der Kohlenmonoxidkonzentration infolge der Rostbewegung auf. Während die Konzentrationen der Hauptverbrennungsprodukte jedoch nur um verhältnismäßig geringe Beträge variieren, zeigen die Konzentrationen der luftverunreinigenden Stoffe weitaus größere Abweichungen.

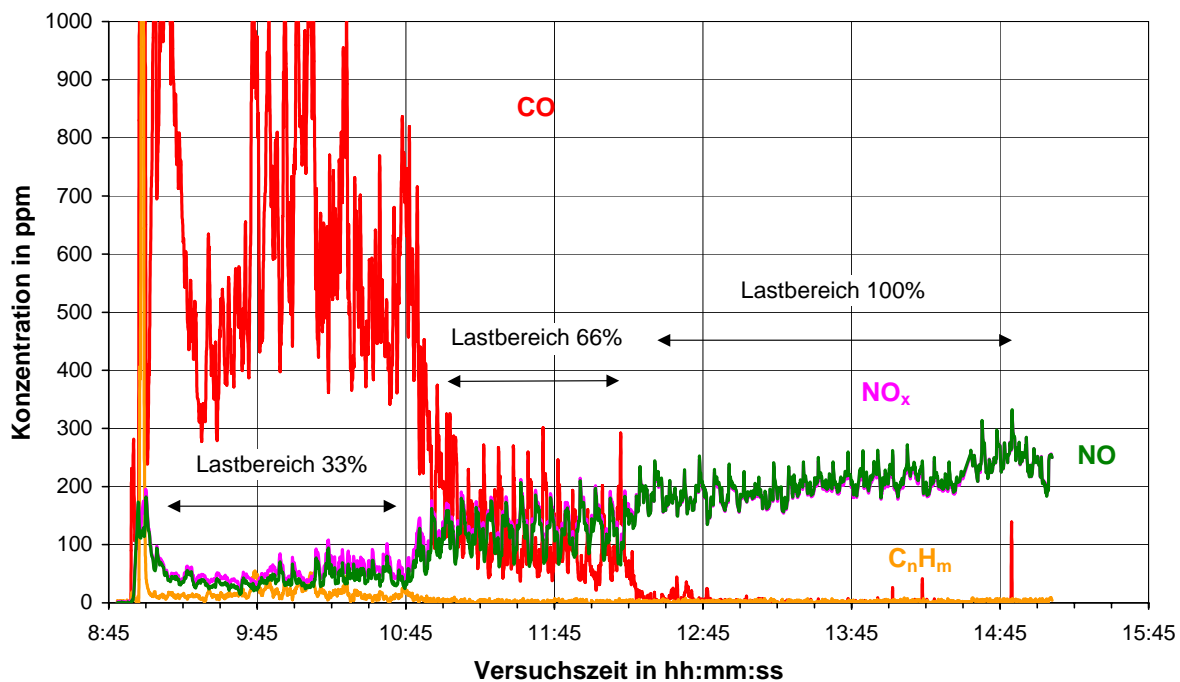


Abbildung 5.8: Zeitliche Konzentrationsverläufe der wichtigsten luftverunreinigenden Stoffe aus der Holzverbrennung in verschiedenen Lastbereichen

In der Tabelle 5.2 sind die verschiedenen Konzentrationsmittelwerte, gebildet als arithmetischer Mittelwert über die Zeiträume konstanter Anlagenleistung, sowie als Maß für die zeitlichen Schwankungen deren Standardabweichungen wiedergegeben.

Tabelle 5.2: Konzentrationsmittelwerte und Standardabweichungen von Haupt- und Luftverunreinigungs-komponenten in den verschiedenen Lastbereichen

Leistung in %	Mittelwert und Schwankung	Hauptabgaskomponenten			luftverunreinigende Abgaskomponenten				
		O <sub>2</sub> in Vol%	CO <sub>2</sub> in Vol%	H <sub>2</sub> O in Vol%	CO in ppm	C <sub>n</sub> H <sub>m</sub> in ppm	NO in ppm	NO <sub>x</sub> in ppm	NO <sub>2</sub> in ppm
33	arith. Mittelwert	16,90	3,61	4,79	526,5	552,3	49,1	65,6	21,6
	Strd.-Abweichung	0,61	0,59	0,65	130,5	128,7	13,1	14,1	4,8
	<b>Verhältnis in %</b>	<b>3,6</b>	<b>16,4</b>	<b>13,5</b>	<b>24,8</b>	<b>23,3</b>	<b>26,8</b>	<b>21,5</b>	<b>22,0</b>
66	arith. Mittelwert	13,40	7,23	8,20	114,5	2,4	123,5	132,9	14,8
	Strd.-Abweichung	1,02	1,02	1,24	59,7	1,8	31,0	29,7	2,9
	<b>Verhältnis in %</b>	<b>7,6</b>	<b>14,1</b>	<b>15,1</b>	<b>52,1</b>	<b>75,4</b>	<b>25,1</b>	<b>22,4</b>	<b>20,0</b>
100	arith. Mittelwert	9,55	11,32	11,59	4,2	2,3	200,9	196,8	1,4
	Strd.-Abweichung	0,90	0,93	0,95	2,7	1,6	20,8	19,5	1,9
	<b>Verhältnis in %</b>	<b>9,4</b>	<b>8,3</b>	<b>8,2</b>	<b>63,1</b>	<b>70,3</b>	<b>10,3</b>	<b>9,9</b>	<b>139,2</b>

Das Verhältnis von Standardabweichung zu arithmetischem Mittelwert verdeutlicht das Ausmaß der zeitlichen Konzentrationsschwankungen. Bei den Hauptabgaskomponenten betragen die Schwankungen um die Mittelwerte maximal 16%, während bei den Luftverunreinigungs-komponenten Werte zwischen 20 und 50% auftreten. Dies zeigt, dass die Veränderung der Verbrennungsbedingungen, die durch die Rostbewegung hervorgerufen wird, sich zweifelsfrei nachteilig auf die Verbrennungsqualität auswirkt. Es werden erhöhte Emissionen von Produkten unvollständiger Verbrennung (Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffverbindungen) verursacht. Die Auswirkung auf die Stickstoffoxidkonzentrationen als Produkte von Brennstoffverunreinigungen ist hingegen geringer, doch werden auch hier erhöhte Emissionskonzentrationen hervorgerufen.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Emissionsmessungen bei der Verbrennung der nicht aufbereiteten Brennstoffqualitäten I) bis IV) dargestellt. Sie sind mit Hilfe der gemessenen Sauerstoffkonzentration auf einen Bezugsauerstoffgehalt im Abgas von 13 Volumenprozent umgerechnet, um sie untereinander und mit den einschlägigen Emissionsgrenzwerten vergleichbar zu machen. Bei ihrer Bewertung wurden die Resultate der vorangehend beschriebenen Überlegungen berücksichtigt. Die Angaben sind Mittelwerte aus zwei bis drei Einzelmessungen. Die Abbildung 5.9 zeigt die Kohlenmonoxidkonzentrationen als arithmetische Mittelwerte über die Zeiträume der Partikelmessung bei den verschiedenen Anlagenleistungen.

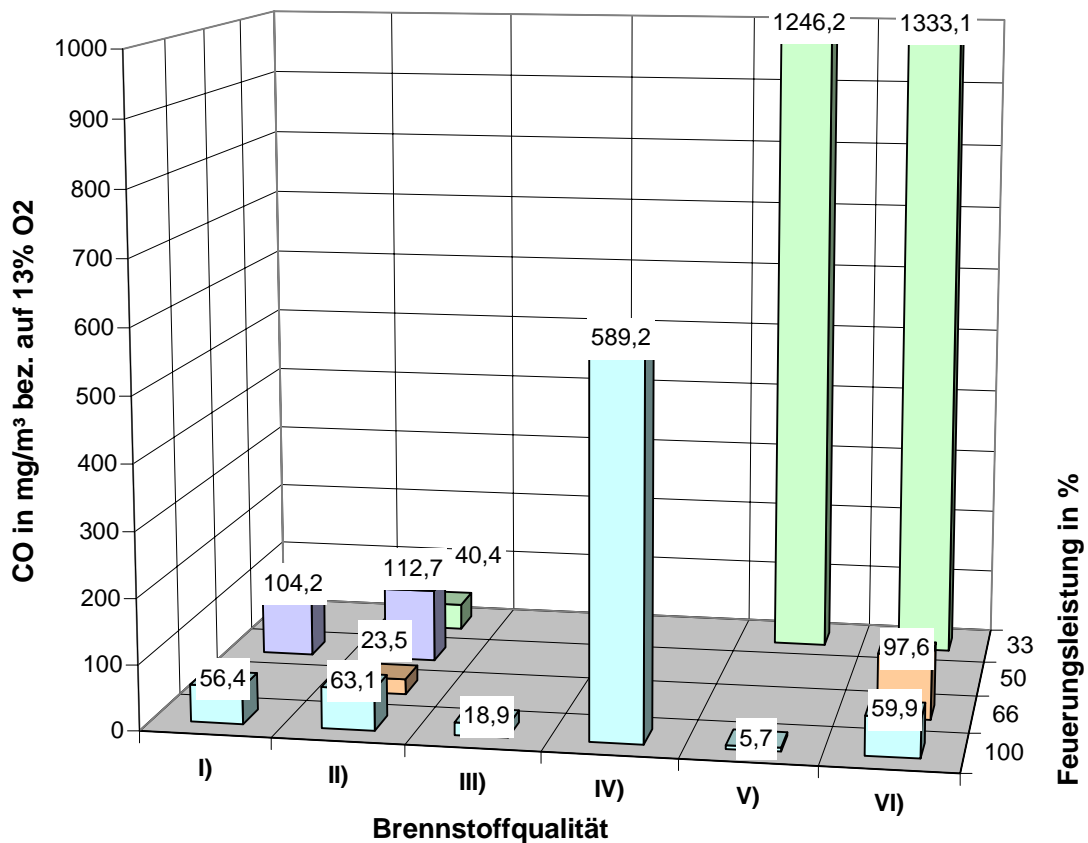


Abbildung 5.9: Kohlenmonoxidkonzentrationen bei der Verbrennung nicht aufbereiteter Brennstoffqualitäten

Insgesamt bewegen sich die CO-Konzentrationen bereits bei der Verbrennung nicht aufbereiteter Brennstoffe auf einem niedrigen Niveau. Dies ist auf die Anpassung der Primärluftströme auf ähnliche Luftüberschusszahlen zurückzuführen. Eine einheitliche Justierung ist nicht möglich, weil die unterschiedlichen Wassergehalte der verschiedenen Brennstoffqualitäten verschiedene Primärluftvolumenströme zur Vortrocknung erforderlich machen.

Die grundlegenden Zusammenhänge zwischen dem Emissionsniveau und dem Lastbereich, in dem die Feuerung betrieben wird, sind deutlich zu erkennen. Bei Nennleistung treten die geringsten Emissionswerte auf, mit sinkender Leistung steigen sie an. Starke Abhängigkeiten zeigen sich zwischen dem Wassergehalt der Brennstoffe und dem Emissionsniveau. Bei dem Brennstoff Rinde IV) ist selbst im Bereich hoher Leistung kein emissionsarmer Betrieb möglich.

Die Interpretation der Kohlendioxidmessung lässt sich sinngemäß auf diejenige der Kohlenwasserstoffmessung übertragen, da beide Stoffe Produkte unvollständiger Verbrennung sind. Die Abbildung 5.10 zeigt, dass die Gesamtkohlenwasserstoffemissionen insgesamt sehr gering sind. Nennenswerte Konzentrationen werden nur bei der Verbrennung der Brennstoffqualitäten V) und VI) bei einem Teillastbetrieb von 33% freigesetzt. Einen wichtigen Zusammenhang offenba-



ren die Konzentrationen an unverbrannten Abgaskomponenten bei der Brennstoffqualität II). Die Leistungsstufen mit 66% und 33% zeigen niedrigere Emissionen als die höheren Leistungen.

Diese Konzentrationsverhältnisse lassen sich mit der Reihenfolge der Versuchsdurchführung erklären. Die betreffenden Leistungsstufen wurden zum Ende einer 48 Stunden dauernden Messreihe untersucht, nach welcher der thermische Zustand der Versuchfeuerung ein maximales Niveau erreicht hat. Die in der Ausmauerung des Feuerraumes gespeicherte Energie ist in der Lage, die Bildung von Produkten unvollständiger Verbrennung für begrenzte Zeit zu verhindern. Alle übrigen Kohlenwasserstoffkonzentrationen bewegen sich in der Nähe der Nachweisgrenze der eingesetzten Messtechnik.

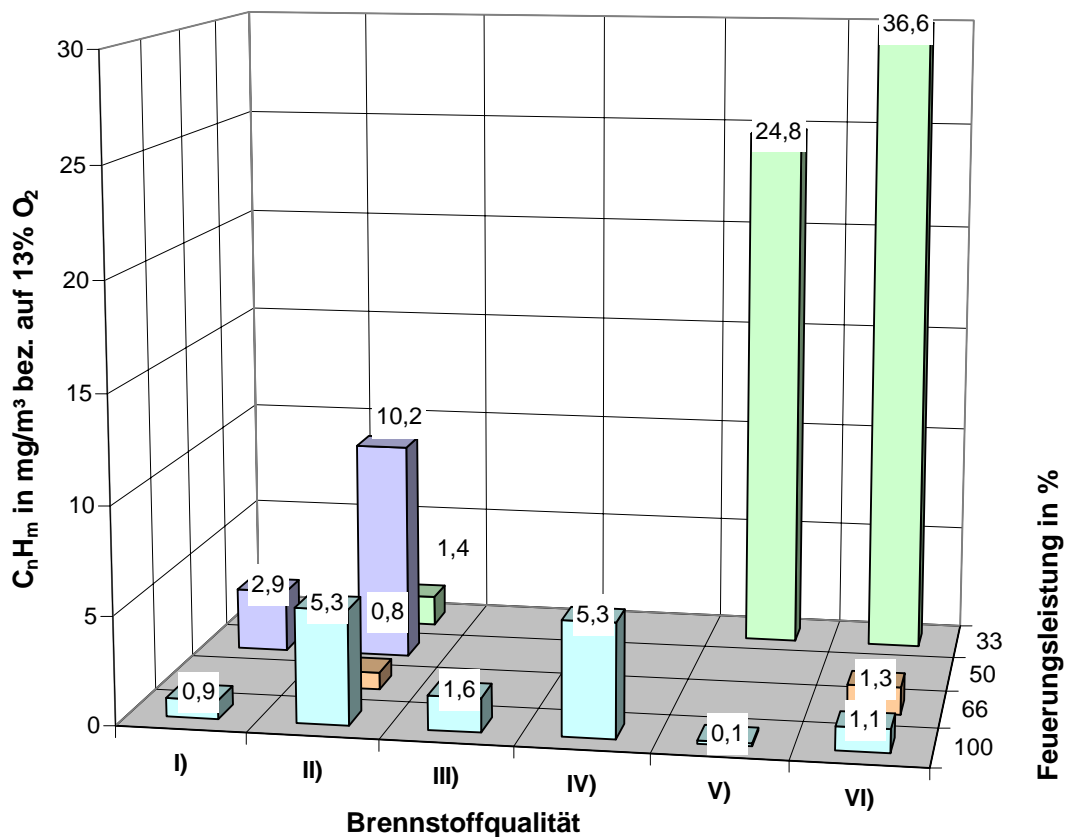


Abbildung 5.10: Gesamtkohlenwasserstoffkonzentrationen bei der Verbrennung nicht aufbereiteter Brennstoffqualitäten

Zusammenfassend ist festzustellen, dass aus den Versuchen mit nicht aufbereiteten Brennstoffen ein Zusammenhang zwischen den chemisch-physikalischen Brennstoffeigenschaften und der Bildung von Produkten unvollständiger Verbrennung nur über den Wassergehalt der Brennstoffqualitäten hergestellt werden kann. Ein hoher Wassergehalt bedingt ein verschlechtertes Emissionsverhalten in Teillastzuständen. Weiter ist die Sensitivität des verwendeten Rostverbren-

nungsprinzips auf den Wassergehalt festzustellen. Während Brennstoffe mit Wassergehalten nahe 50% noch problemlos über einen weiten Lastbereich emissionsarm verbrannt werden können, ist bei einem Wassergehalt von 60% (Rinde) kaum noch ein vertretbarer Betrieb bei Nennleistung möglich.

Die Abbildung 5.11 zeigt die emittierten Stickstoffoxidkonzentrationen  $\text{NO}_x$  als Summe von  $\text{NO}$  und  $\text{NO}_2$ . Auch bei dieser Gruppe luftverunreinigender Stoffe zeigt sich eine Abhängigkeit zwischen der Feuerungsleistung und den Emissionen. Höhere Feuerungsleistungen bewirken durch höhere Verbrennungstemperaturen eine erhöhte Oxidationsrate des im Brennstoff enthaltenen Stickstoffes. Die emittierten Konzentrationen steigen mit der Anlagenleistung. Eine Ausnahme bilden hier die Leistungsstufen mit der Brennstoffqualität II) bei denen erhöhte  $\text{CO}$ -Konzentrationen zu verzeichnen sind (vgl. Abbildung 5.9). Hier spielen Reduktionsreaktionen eine Rolle, die entstandenes Stickstoffmonoxid mit Hilfe von  $\text{CO}$  als Reduktionsmittel zu molekularem Stickstoff umwandeln.

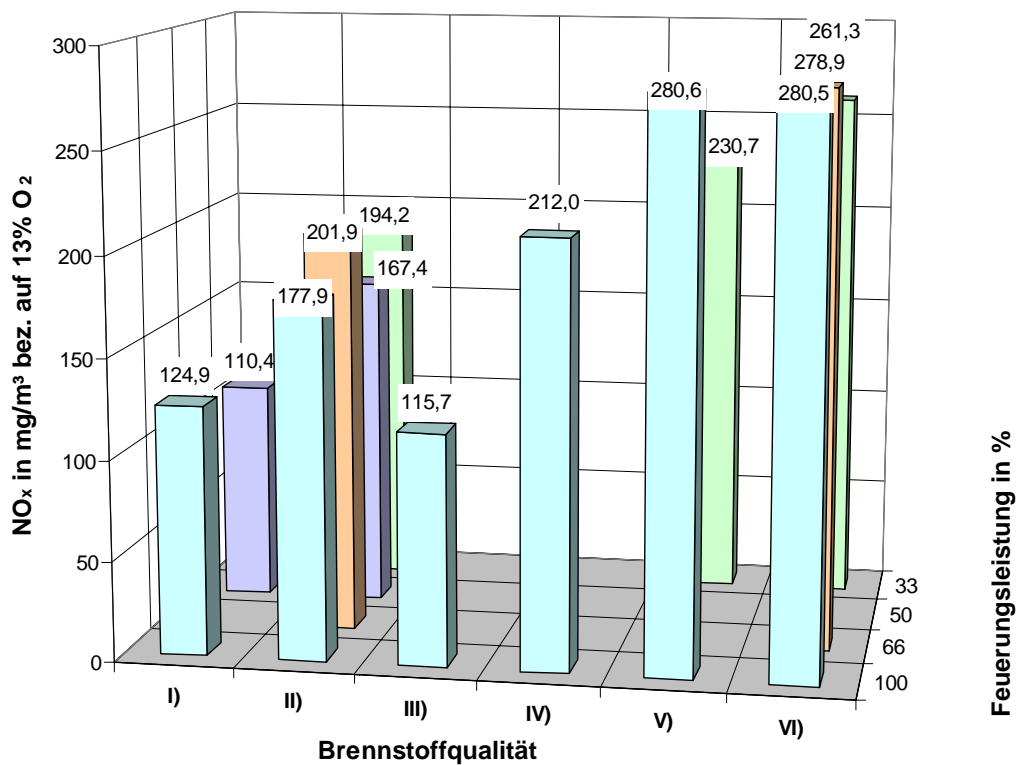


Abbildung 5.11:  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen bei der Verbrennung nicht aufbereiteter Brennstoffqualitäten

In der Abbildung 5.12 sind die gemessenen  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen aus dem vorigen Diagramm über dem Stickstoffgehalt des Brennstoffes aufgetragen. Der Zusammenhang zwischen der chemischen Zusammensetzung und zu erwartenden Emissionen wird deutlich.

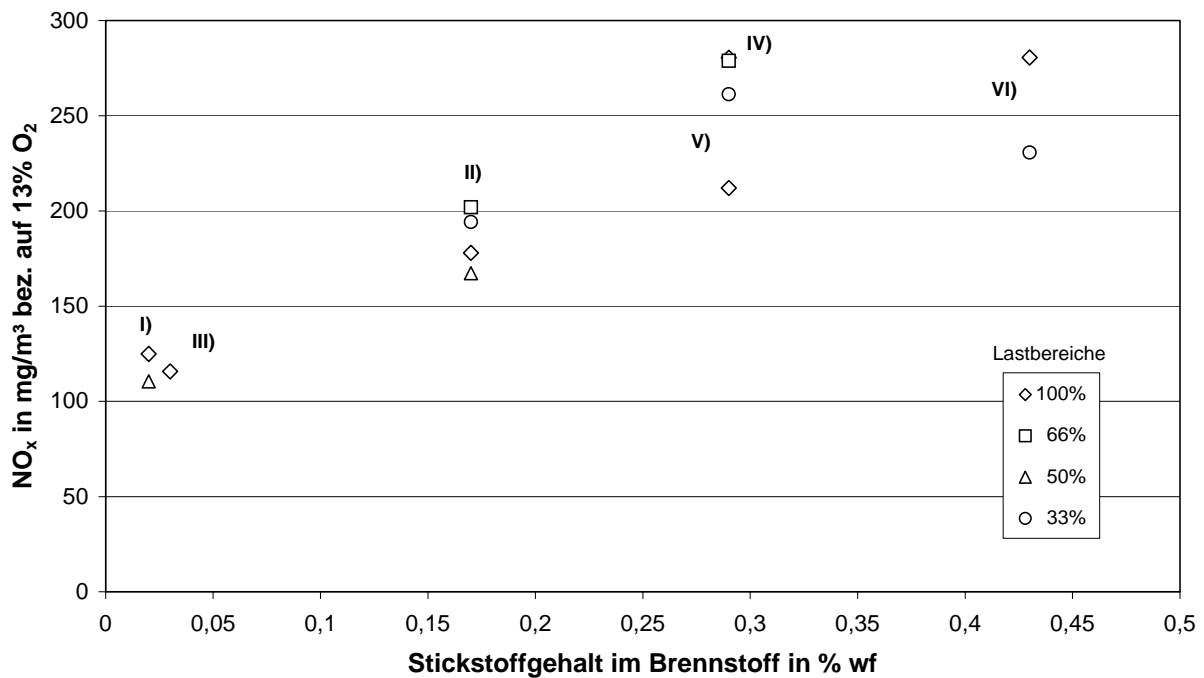


Abbildung 5.12: Zusammenhang zwischen dem Stickstoffgehalt von Waldholzbrennstoffen und den NO<sub>x</sub>-Emissionen bei der Verbrennung

Bei der Verbrennung von biogenen Festbrennstoffen entsteht neben Stickstoffmonoxid, dem primären Oxidationsprodukt des Brennstoffstickstoffes, in geringen Mengen Distickstoffmonoxid, sogenanntes Lachgas. Die schädliche Wirkung beruht auf dem Treibhauspotenzial dieser Gasverbindung. In der Abbildung 5.13 sind die erfassten Konzentrationen wiedergegeben. Das Emissionsniveau ist erwartungsgemäß gering. Es hängt ebenso wie beim NO<sub>x</sub> vom Leistungsbe-  
reich ab, in dem die Feuerung betrieben wird bzw. vom Vorhandensein von CO als Reduktions-  
mittel.

Die Ergebnisse der Gesamtstaubmessung nach dem Planfilterverfahren sind in der nachfolgen-  
den Abbildung 5.14 dargestellt.

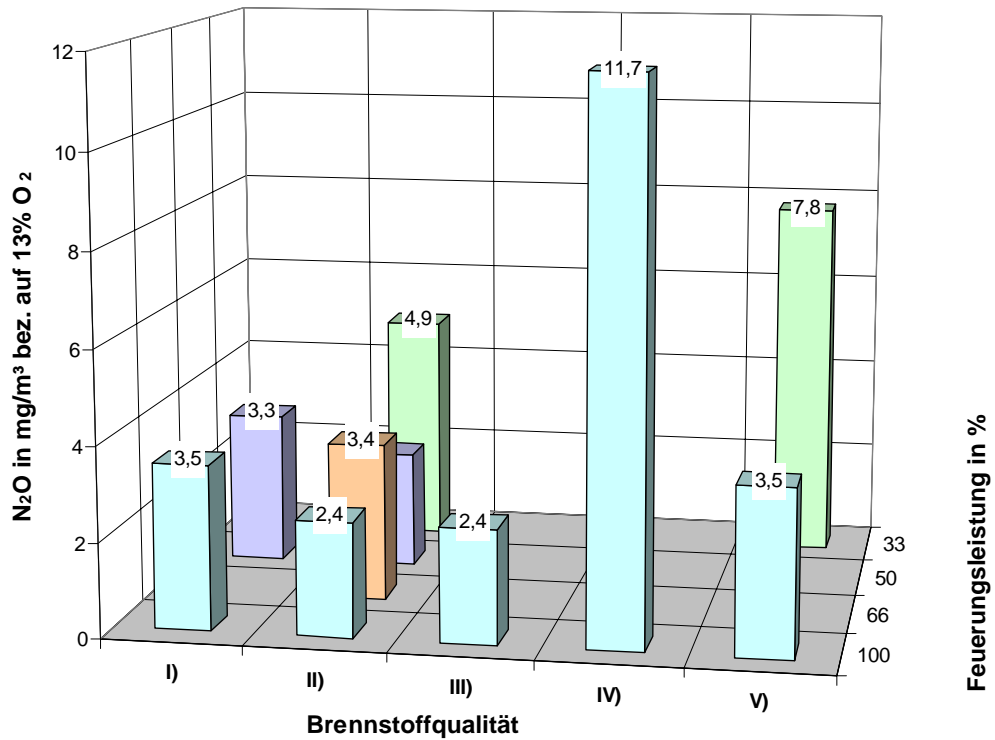


Abbildung 5.13:  $N_2O$ -Konzentrationen bei der Verbrennung nicht aufbereiteter Brennstoffqualitäten

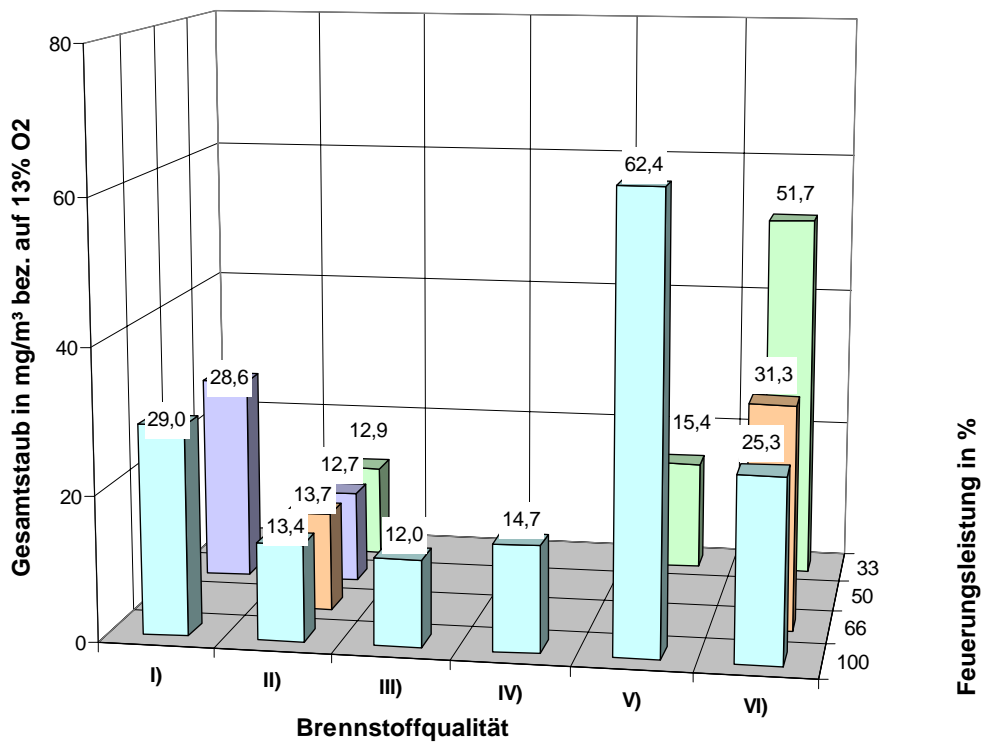


Abbildung 5.14: Gesamtstaub-Konzentrationen bei der Verbrennung nicht aufbereiteter Brennstoffqualitäten

Die gemessenen Konzentrationen bewegen sich insgesamt auf ähnlich niedrigem Niveau wie die der gasförmigen Luftverunreinigungs-komponenten.

Zusammenhänge mit der Anlagenleistung, dem Wassergehalt oder der chemischen Zusammensetzung der verschiedenen Brennstoffqualitäten sind zumindest nicht offensichtlich. Auffällig ist jedoch, dass der Brennstoff V), eine Qualität aus der Landschaftspflege, sowohl die höchste Staubkonzentration emittiert als auch den höchsten Aschegehalt aufweist.

In der Abbildung 5.15 sind die Gesamtstaubkonzentrationen der Brennstoffe mit den Ascheanteilen korreliert. Es zeigt sich jedoch kein unmittelbarer Zusammenhang.

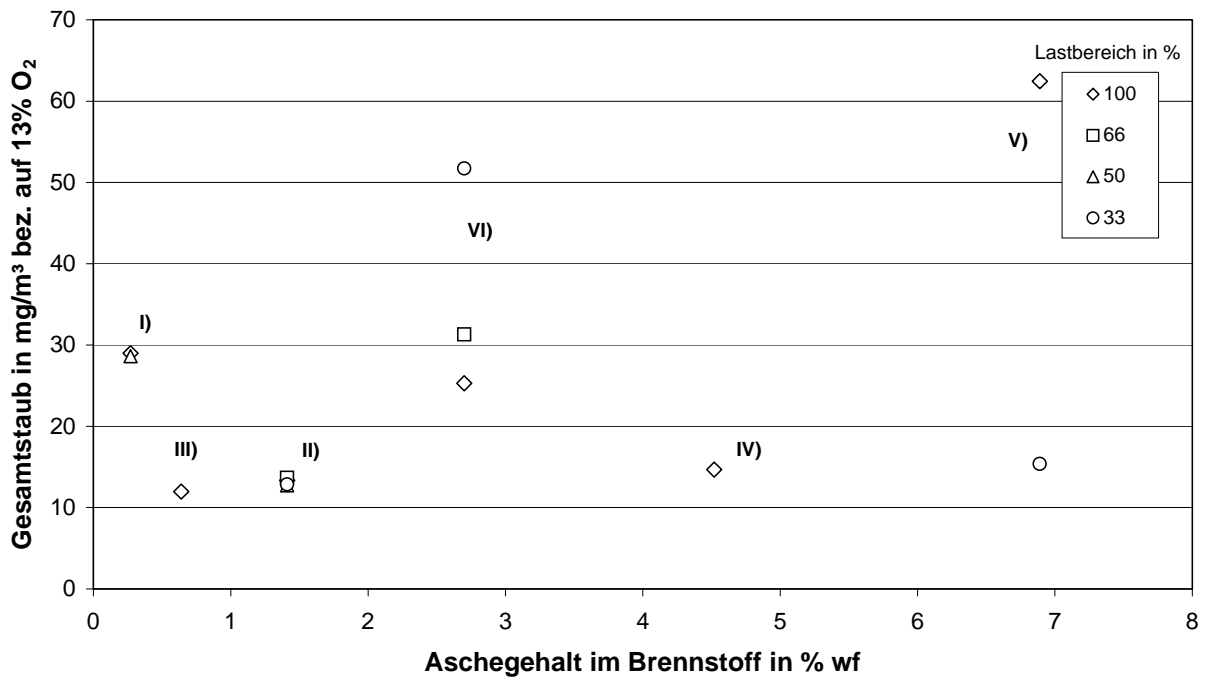


Abbildung 5.15: Zusammenhang zwischen dem Aschegehalt von Waldholzbrennstoffen und den Gesamtstaub-Emissionen bei der Verbrennung

Für die Staubemissionen von Holzbrennstoffen sind Abhängigkeiten von physikalischen Brennstoffeigenschaften und von feuerungstechnischen Randparametern größer, als die von den oben angeführten Charakteristika. So liegt die Vermutung nahe, dass der Staubgehalt des Abgases mit dem Primärluftvolumenstrom zusammenhängt, der das Brennstoffbett auf dem Feuerungsrost durchströmt.

Mit dem Brennstoff I) wurden deshalb zusätzlich verschiedene Verbrennungslufteinstellungen untersucht. Über die Variation von Primär und Sekundärluftströmen wurden verschiedene Luftüberschusszahlen im Primärfeuerraum, d.h. über dem Brennstoffbett und für die Gesamtfeuerung eingestellt. Die Abbildung 5.16 zeigt einen deutlichen Zusammenhang zwischen der Primärluftmenge und der Gesamtstaubemission.

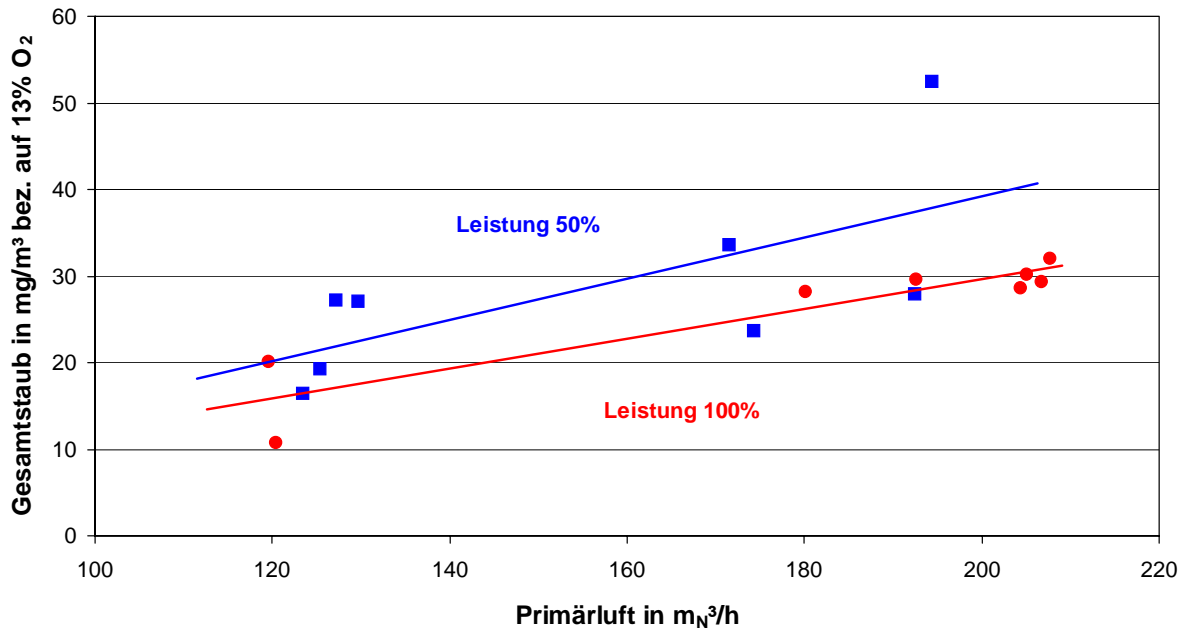


Abbildung 5.16: Gesamtstaubkonzentration in Abhängigkeit vom Primärluftvolumenstrom durch das Brennstoffbett einer Rostfeuerung

Dies legt die Vermutung nahe, dass die Gesamtstaubkonzentration im Abgas mit dem Feinanteil des Brennstoffes in der Weise zusammenhängt, dass kleine Brennstoffpartikel durch den Rostluftstrom aus dem Brennstoffbett ausgetragen werden.

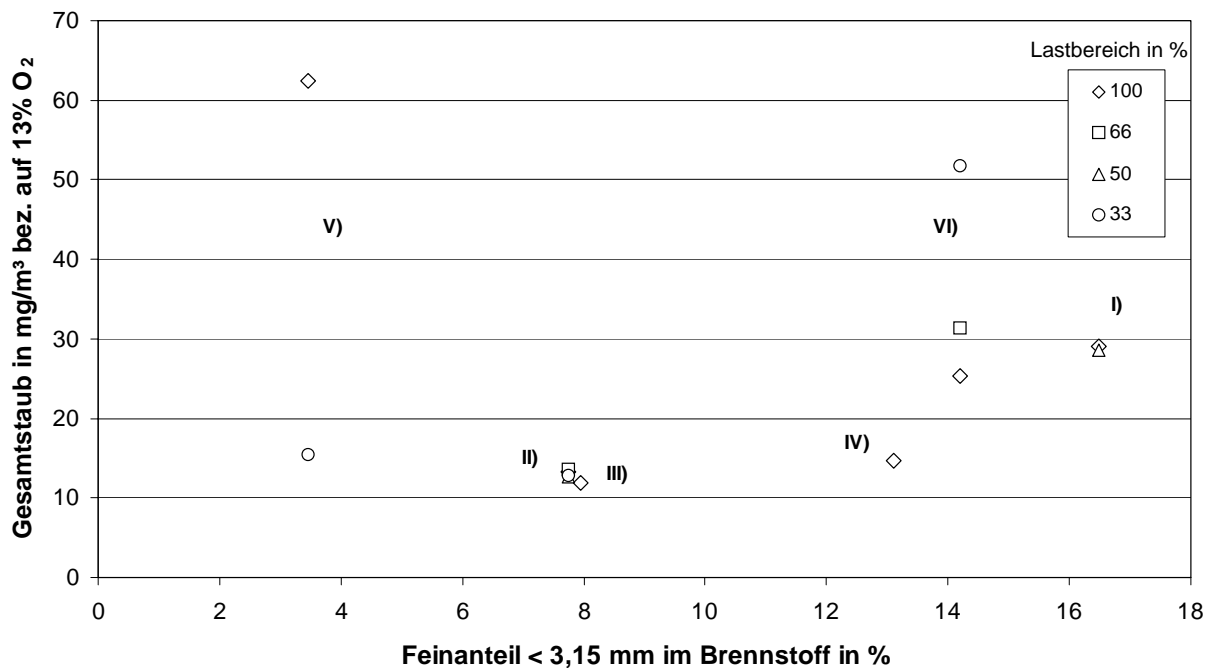


Abbildung 5.17: Gesamtstaubkonzentration in Abhängigkeit vom Feinanteil < 3,15 mm der nicht aufbereiteten Brennstoffe

In der Abbildung 5.17 zeigt sich jedoch ebenfalls kein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Feinanteil der verschiedenen Brennstoffqualitäten und den Gesamtstaubemissionen. Gerade die Qualität V), der Landschaftspflege-Brennstoff, hat den geringsten Feinanteil, zeigt aber in Abhängigkeit der Anlagenleistung die höchsten Gesamtstaubemissionen.

Die Abbildung 5.18 ist exemplarisch für die nicht aufbereiteten Brennstoffqualitäten die Partikelgrößenverteilung dargestellt, die bei der Verbrennung der Brennstoffqualität II) unter Nennleistungsbedingungen mit einem Kaskadenimpaktor gemessen wurde.

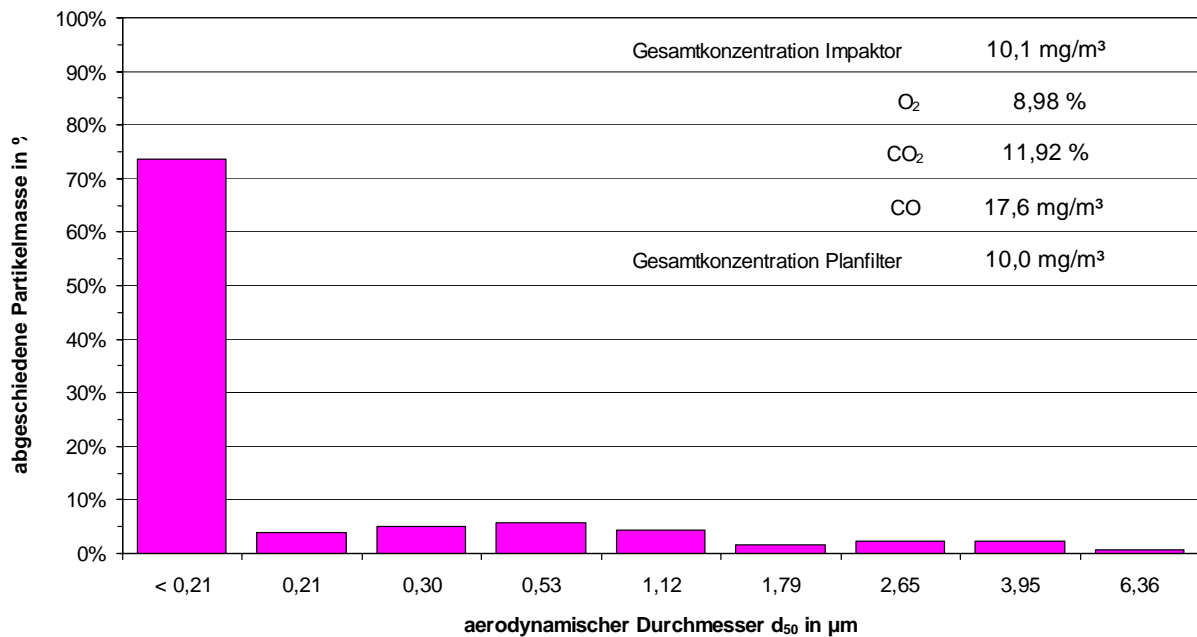


Abbildung 5.18: Korngrößenverteilung der Partikelemissionen bei der Verbrennung der Brennstoffqualität II) bei Feuerungsnennleistung

Die Versuchsreihen haben gezeigt, dass eine emissionsarme Verbrennung nicht aufbereiteter Waldholzbrennstoffe bereits möglich ist, wenn eine sorgsame Abstimmung der Feuerungstechnik auf die Brennstoffqualität erfolgt. In der Praxis bereitet dies oft Schwierigkeiten, vor allem weil die Brennstoffqualität von Charge zu Charge Schwankungen unterworfen ist und eine Neuparametrierung der Feuerungsanlage aus Zeit- und Kostengründen unterbleibt, oder weil sie als Problem gar nicht erkannt wird.

### 5.3 Aufbereitete Brennstoffe

Die im Kapitel 2.3 genannten Brennstoffqualitäten VII bis X) aus Waldrestholz und aus Landschaftspflegeholz wurden entsprechend den in der Abbildung 2.7 dargestellten Verfahrensweisen aufbereitet und auf ihr Verbrennungsverhalten hin untersucht. Die Feuerungsanlagen, die dabei eingesetzt wurden, sind im Kapitel 5.1 beschrieben.

Die Qualität VII) stammt aus sogenanntem *waldfrischen* Waldrestholz, d.h. Schlagabraum aus der Holzernte des Winters 2003/2004 wurde zeitnah zur Fällung der Bäume mit einem selbstfahrenden Großhacker gesammelt und zerkleinert. Anschließend wurde der Brennstoff in zerkleinerter Form über einen Zeitraum von 2 Wochen als Haufwerk unter Dach gelagert und dabei mit einem Radlader mehrmals umgesetzt und durchmischt. Ausgehend von einem Wassergehalt des Grundstoffes von 55 bis 65 % zeigt dieses Zwischenlagerungsverfahren für die passive Trocknung ein Potenzial von ca. 25%. Für den Heizwert bedeutet dies eine Steigerung von immerhin 30% bis 40% [7]. Somit kann durch eine einfache kostengünstige Aufbereitungsmethode mit geringem apparativen Aufwand eine signifikante Qualitätssteigerung realisiert werden.

Die Brennstoffqualität VIII) unterscheidet sich von der vorangehend beschriebenen durch einen zusätzlich durchgeführten Klassierungsprozess. Dieser hat die Abtrennung besonders großer Brennstoffstücke zum Ziel, die speziell in Feuerungsanlagen kleiner Leistung oft zu Betriebsstörungen und Anlagenausfällen führen. Solche Verbrennungsanlagen sind für die Brennstoffzuführung meist mit Schneckenfördersystemen ausgestattet, die durch große Brennstoffstücke blockiert werden können. Die Klassierung von zerkleinerten Waldholzbrennstoffen erfordert geeignete Technik in Form von Plan-, Trommel- oder Sternradsieben und ist somit mit entsprechendem Investitionsaufwand verbunden. Die Ergebnisse eigener Siebversuche (vgl. Kap. 4.1.3) zeigen, dass die entstehende Größenverteilung von den verwendeten Siebgrößen abweichen kann. Die zuverlässigen Abtrennung grober Fraktionen ist trotzdem möglich, erfordert jedoch einige Erfahrung im Umgang mit der Siebtechnik.

Entsprechend der Definition des CEN-Normenvorschlages stellt der Brennstoff IX) eine Verschnittqualität, d.h. eine beabsichtigt produzierte Mischung dar. Die Herstellung erfordert eine Aufbereitung der Grundstoffe, die im vorliegenden Fall aus Landschaftspflegeholz von kommunalen Sammelstellen und aus Waldrestholz bestehen. Das Landschaftspflegeholz wurde mit einem Schredder zerkleinert und nachfolgend mit einem Sternradsieb klassiert, um den Feinanteil abzutrennen, in welchem sich Fremdstoffe wie Erd- und Sandanhaftungen ansammeln. Landschaftspflegehölzer von kommunalen Sammelplätzen müssen zudem von Fremdstoffen wie



Kunststoffresten oder Metallteilen befreit werden, bevor sie als Brennstoff genutzt werden können. Zur Aufbereitung dieser Brennstoffqualität wurde deshalb ein Metallabscheider verwendet.

Das Waldrestholz wurde mit einem stationären Trommelhacker zerkleinert und nicht weiter aufbereitet. Die Verwendung eines Schredders ist grundsätzlich ebenfalls möglich. Das gesamte Aufbereitungsverfahren ist von apparativer Seite ebenso aufwendig wie das voranstehend beschriebene. Es erfordert darüber hinaus einigen logistischen Aufwand zur Sammlung der Fraktion aus der Landschaftspflege, bietet aber andererseits auch die Möglichkeit, sich die Entsorgung dieser Qualität vergüten zu lassen.

Als veredelte Aufbereitungsform eines biogenen Festbrennstoffes wurde das Emissionsverhalten von Pellets untersucht. Nach dem gegenwärtigen Stand der Technik werden Holzpellets ausschließlich aus Sägespänen, also Reststoffen der Holzindustrie produziert. Nach den gängigen Normen [4, 20, 21] dürfen sie zum Teil Presshilfs- bzw. Bindemittel aus natürlichen Stoffen wie Stärke oder Melasse enthalten. Die verwendete Pelletierungstechnik basiert auf Matrizenpressverfahren in Ringmatrizen oder auf Kollergängen. Die Entwicklungen stammen aus der Tierfuttermittelproduktion. Die Produktion von Holzpellets ist technisch und wirtschaftlich aufwendig. Industrielle Produktionslinien bestehen aus einer Vorzerkleinerung in einer Hammermühle, einer Konditionierung, um einen definierten Wassergehalt sicherzustellen, der Pelletpresse sowie einer nachgeschalteten Kühlung.

Holzpellets enthalten einen vergleichsweise geringen Anteil an Wasser (ca. 5 bis 10%) und sind somit nicht zur Verbrennung in Rostfeuerungsanlagen geeignet, die auf die Nutzung von besonders wasserhaltigen Brennstoffen (ab ca. 30%) hin optimiert sind. Deshalb wurde für die Emissionsuntersuchungen eine Feuerung ausgewählt, deren Verbrennungsprinzip speziell für trockene Brennstoffe aus der Holzverarbeitung entwickelt wurde.

Für die Untersuchung des Emissionsverhaltens wurden die Versuchsbedingungen anders gewählt als bei den Experimenten mit den nicht aufbereiteten Brennstoffqualitäten. Nachdem die Auswertung der Versuche mit den nicht aufbereiteten Brennstoffqualitäten keine zweifelsfreien Rückschlüsse über die Zusammenhänge zwischen dem Aschegehalt, dem Feinanteil und der Verbrennungsluftmenge mit den gemessenen Staubemissionen zuließen, wurden anstatt die Verbrennungsbedingungen anhand der Luftüberschusszahl  $\lambda$  zu optimieren alle Brennstoffqualitäten und Leistungsstufen mit unveränderten Lufteinstellungen untersucht. Auf diese Weise sollte die Anzahl der Versuchsvariablen reduziert werden.

In der Abbildung 5.19 sind die Kohlenmonoxid-Emissionen dargestellt, die bei der Verbrennung der Brennstoffqualitäten VII) bis X) gemessen wurden. Die Folgerungen aus den Versuchen mit nicht aufbereiteten Brennstoffen hinsichtlich des Zusammenhanges zwischen dem Lastbereich der Rostfeuerung und den Emissionen an unverbrannten Zersetzungsprodukten lassen sich grundsätzlich bestätigen: Bei Schwachlast steigen die CO-Emissionen an.

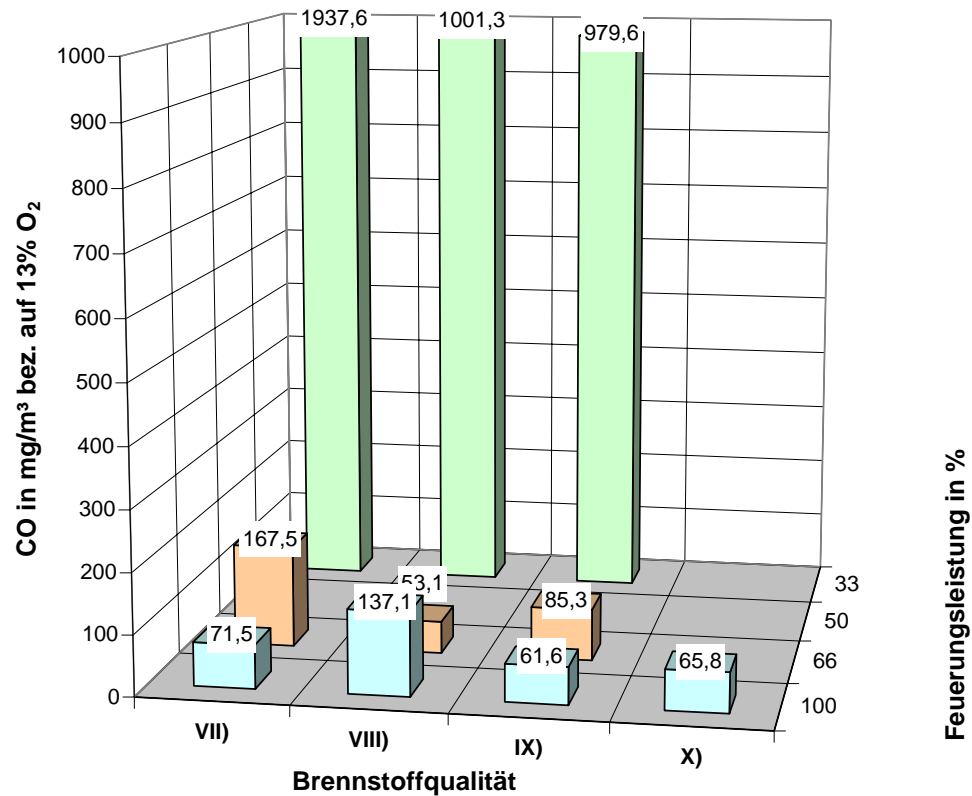


Abbildung 5.19: Kohlenmonoxidkonzentrationen bei der Verbrennung aufbereiteter Brennstoffqualitäten

In den Lastbereichen 100% und 66% zeigen die Brennstoffe ein zufriedenstellendes Emissionsniveau. Auffällig sind die besonders hohen CO-Konzentrationen im Schwachlastbetrieb. Anhand der Luftüberschusszahlen, die der nachstehenden Tabelle 5.3 zu entnehmen sind zeigt sich, dass in diesem Leistungsbereich die Verbrennungsbedingungen durch zu viel Verbrennungsluft gestört werden. Der hohe Luftüberschuss bewirkt eine Abkühlung des Feuerraumes in brennstoffnahen Zonen unter die Reaktionstemperaturen die für die Umsetzung des Kohlenmonoxids erforderlich sind. Die Wassergehalte der Brennstoffqualitäten VII) bis IX) sind ähnlich (vgl. Abb. 4.1) so dass ein Zusammenhang mit dem Emissionsniveau hier auszuschließen ist. Die Gesamtkohlenwasserstoffkonzentrationen in der Abbildung 5.20 bestätigen die voranstehenden Schlussfolgerungen.

Tabelle 5.3: Luftüberschusszahl  $\lambda$  der verschiedenen Leistungsstufen bei der Verbrennung aufbereiteter Brennstoffqualitäten

Brennstoffqualität Anlagenleistung	VII)	VIII)	IX)	X)
100%	1,54	1,50	1,51	1,98
66%	2,18	2,24	2,29	-
33%	4,24	4,17	4,21	-

Jedoch sei an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen, dass sich die niedrigen Konzentrationswerte an der Nachweisgrenze des Messgerätes bewegen. Auffällig ist weiter, dass der Zusammenhang zwischen CO und Kohlenwasserstoffemissionen zwar insgesamt immer wieder nachzuvollziehen ist, er jedoch bei manchen Verbrennungszuständen nicht gegeben zu sein scheint. So zeigen die Brennstoffqualitäten VII) und VIII) im Lastbereich von 33% sehr hohe CO-Emissionen, die Kohlenwasserstoffkonzentration des beim Brennstoff VIII) ist jedoch deutlich geringer als beim Brennstoff VII). Offensichtlich sind die Verbrennungsbedingungen zur Umsetzung von Kohlenwasserstoffen hier noch ausreichend, während CO, das zu seiner vollständigen Oxidation eine Reaktionstemperatur von über 770°C benötigt, nicht mehr abreagieren kann.

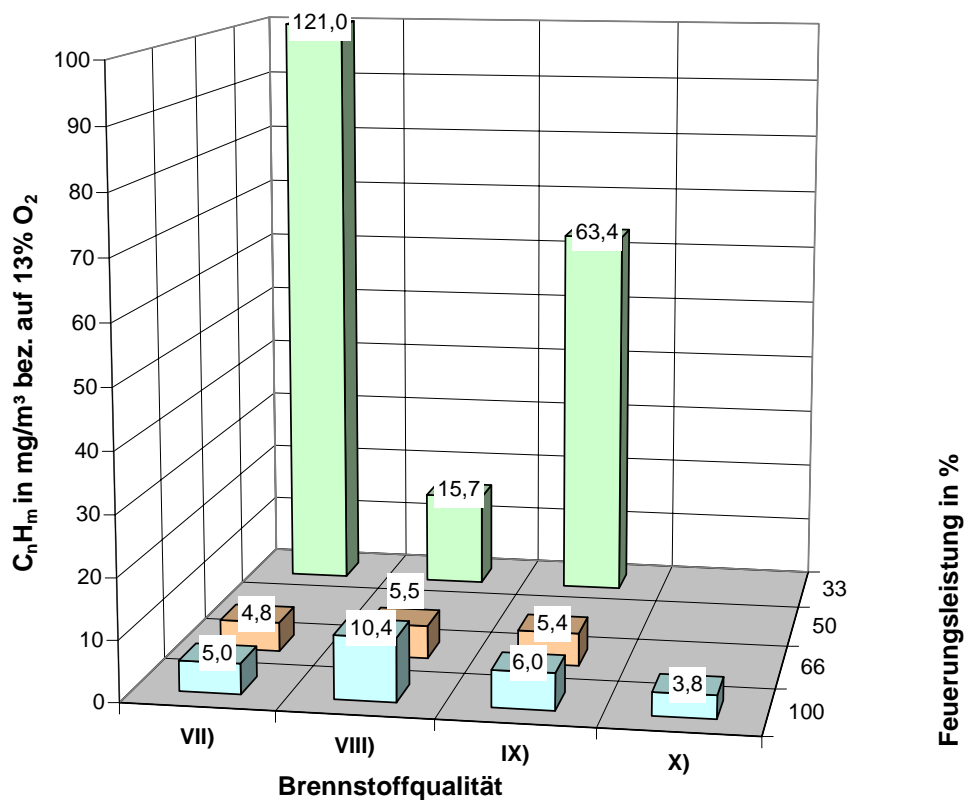


Abbildung 5.20: Gesamtkohlenwasserstoffkonzentrationen bei der Verbrennung aufbereiteter Brennstoffqualitäten

Die Abbildung 5.21 zeigt die  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen bei den Versuchen mit aufbereiteten Brennstoffen. Der Zusammenhang zwischen der Anlagenleistung und den Emissionsniveau, der in der Abbildung 5.11 zu erkennen war, ist hier weit weniger ausgeprägt. Auffällig ist der besonders niedrige  $\text{NO}_x$ -Gehalt im Abgas der modifizierten Unterschubfeuerung mit Abgasrezirkulation bei der Verbrennung von Holzpellets X). Offensichtlich greift die Rezirkulation als primäre Minderungsmaßnahme zur Verringerung der Stickstoffoxidemissionen.

Die Abbildung 5.22 stellt die gemessenen Konzentrationen über dem Stickstoffgehalt der aufbereiteten Brennstoffe dar. Der Zusammenhang ist ebenso wie in der Abbildung 5.12 klar ersichtlich. Von den beschriebenen Aufbereitungsverfahren ist hinsichtlich einer Änderung des Brennstoff-Stickstoffgehaltes nur vom Verschneiden eine Auswirkung zu erwarten. Vergleicht man die Stickstoffgehalte der untersuchten Brennstoffqualitäten aus der Landschaftspflege (V), VI und IX) in der Abbildung 4.11 so zeigt sich, dass der N-Gehalt der Verschnittqualität zumindest im Vergleich mit den beiden anderen untersuchten Brennstoffen auf ähnlich hohem Niveau liegt. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass der Stickstoffgehalt von Waldrestholz, das hier zugemischt wurde, je nach Herkunft und Zusammensetzung über einen Bereich von 0,2 bis 0,8 Prozent bezogen auf die aschefreie Trockenmasse schwanken kann. Somit ist durch das Verschneiden nicht zwangsläufig eine Senkung des Stickstoffgehaltes zu erreichen.

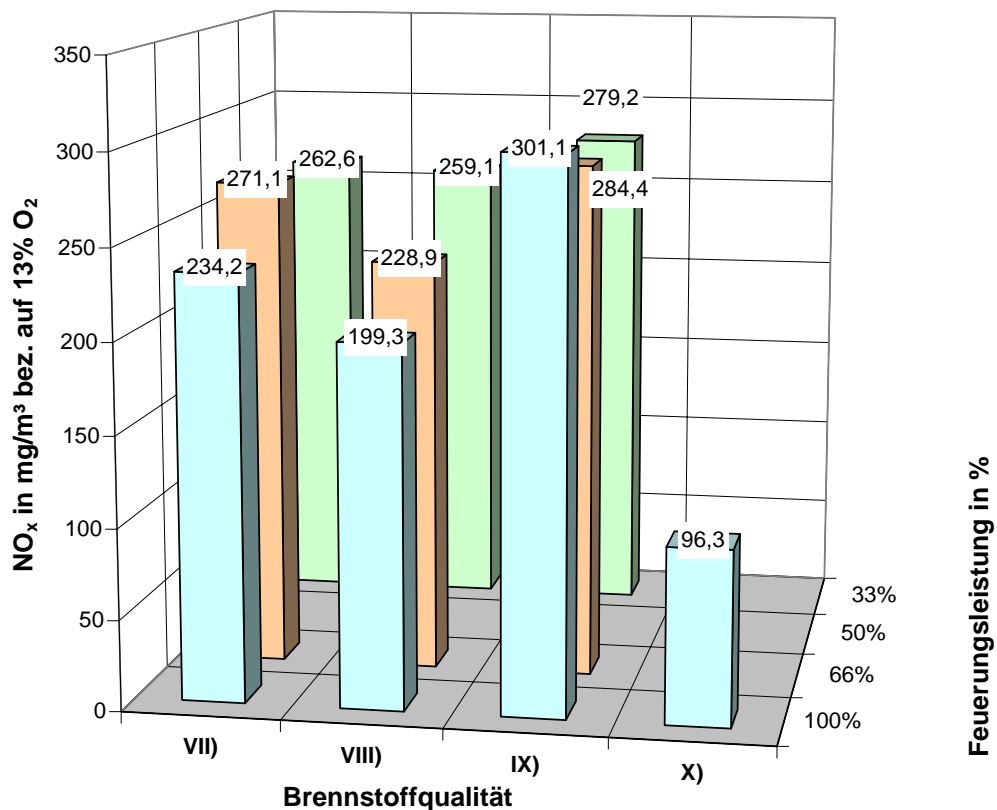


Abbildung 5.21:  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen bei der Verbrennung aufbereiteter Brennstoffqualitäten

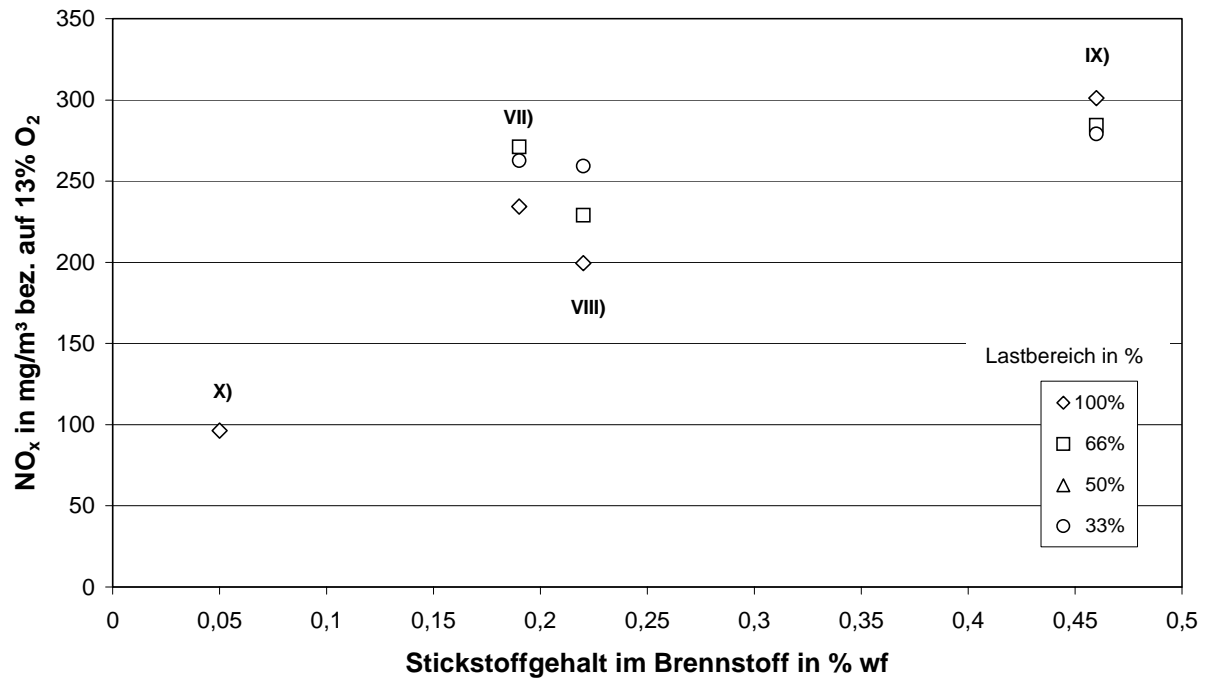


Abbildung 5.22: Zusammenhang zwischen dem Stickstoffgehalt von aufbereiteten Brennstoffqualitäten und den NO<sub>x</sub>-Emissionen bei der Verbrennung

Aufschlussreich sind die Ergebnisse der Gesamtstaubmessungen bei der Verbrennung aufbereiteter Walsholz Brennstoffe. Die Abbildung 5.23 gibt die Konzentrationen wieder. Im Nennleistungsbereich liegen insbesondere die Werte auf gleichem Niveau, die an der Rostfeuerung bei unveränderter Verbrennungslufteinstellung ermittelt wurden. Die in den Sekundärfeuerraum integrierte Staubabscheidung scheint ähnlich wirksam zu sein wie die Multizyklonabscheidung der Rostfeuerungsanlage. Die Unterschiede im Emissionsniveau der Leistungsstufen 100% und 66% sind gering, während im Schwachlastbetrieb (33%) eine deutliche Zunahme der Staubkonzentration im Abgas zu verzeichnen ist.

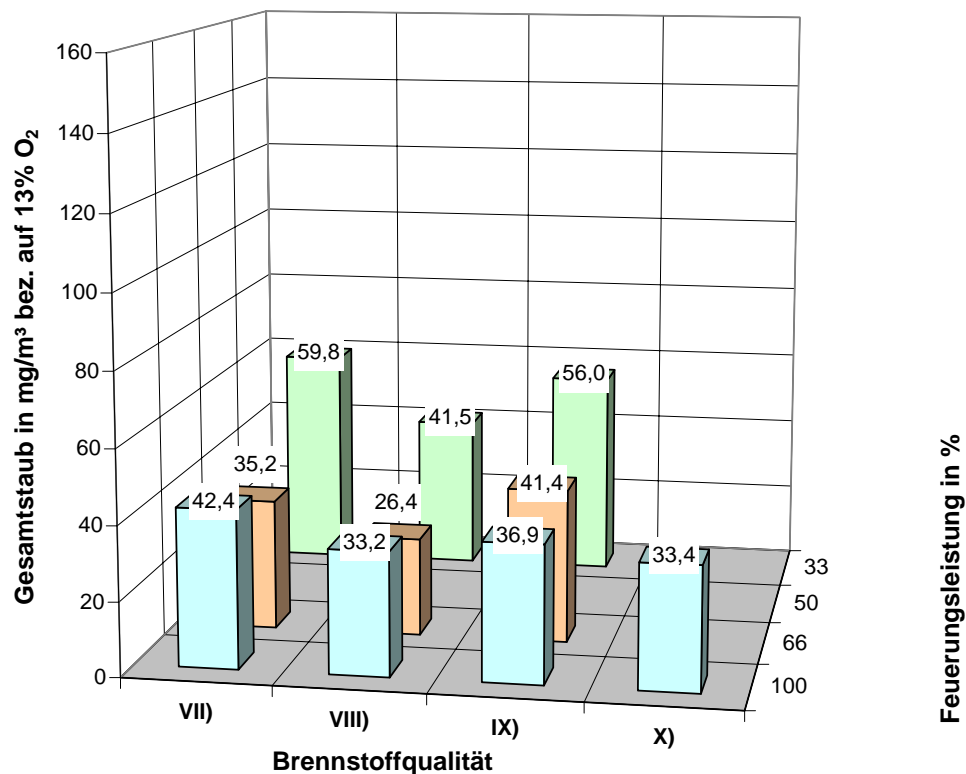


Abbildung 5.23: Gesamtstaubkonzentrationen bei der Verbrennung aufbereiteter Brennstoffqualitäten (ohne Optimierung der Verbrennungslufteinstellungen)

Im Vergleich zu den Emissionsergebnissen der Untersuchungen mit nicht aufbereiteten Brennstoffqualitäten zeigen sich aufgrund der nicht angepassten Verbrennungslufteinstellungen geringfügig höhere Konzentrationen. Trotzdem ist das Emissionsniveau insgesamt sehr zufriedenstellend.

Die Abbildung 5.24 setzt den Aschegehalt mit den Staubemissionen in Beziehung. Ein in anderen Untersuchungen festgestellter Zusammenhang zwischen dieser Brennstoffeigenschaft und der Gesamtstaubemission lässt sich auch hier, wo die Primärlufteinstellung als Versuchsparameter fixiert wurde, nicht eindeutig bestätigen.

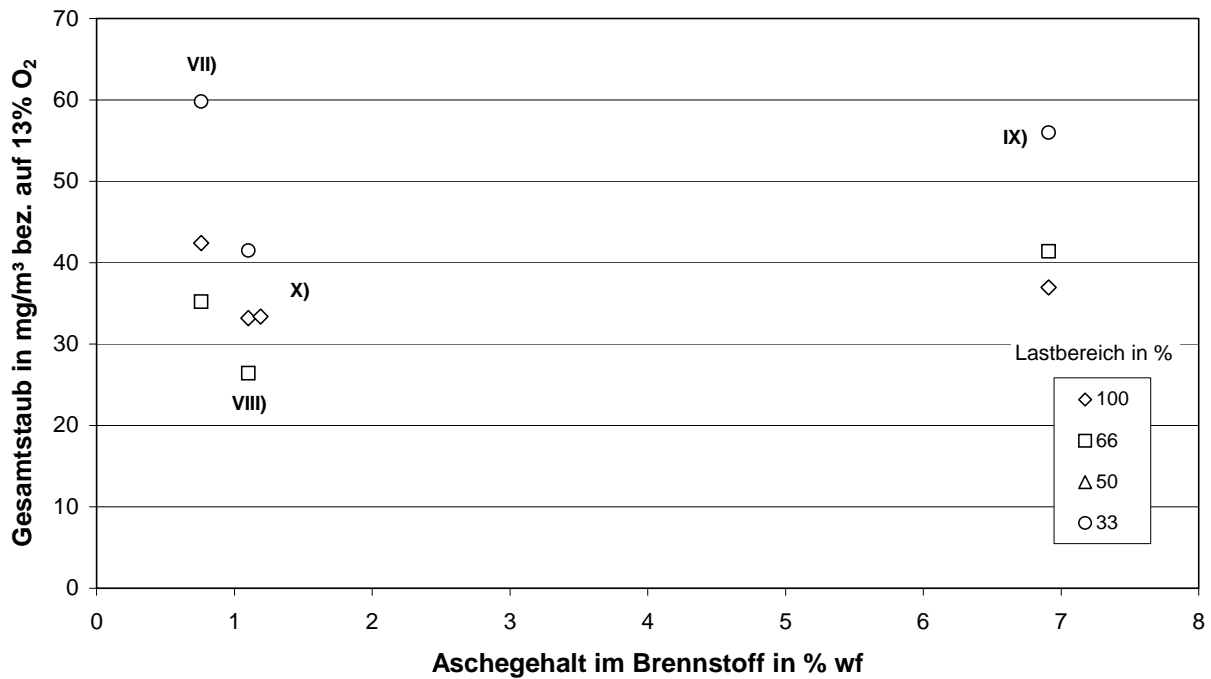


Abbildung 5.24: Zusammenhang zwischen dem Aschegehalt von aufbereiteten Brennstoffqualitäten und den Gesamtstaub-Emissionen bei der Verbrennung

Der Vergleich der Staubkonzentrationen mit dem Feinanteil der aufbereiteten Brennstofffraktionen in der Abbildung 5.25 zeigt wiederum keinen eindeutigen Zusammenhang. Eine Ursache hierfür mag in der chemischen Zusammensetzung der Feinanteile liegen. Wie zu Anfang des Kapitels geschildert, sammeln sich im Feinanteil besonders von Brennstoffen aus der Landschaftspflege Fremdstoffe wie Sand und Erdanhaftungen und beeinflussen damit auch die physikalischen Eigenschaften der Asche wie beispielsweise die Dichte oder das Sinter- und Schmelzverhalten. Betriebserfahrungen mit Holzbrennstoffen höheren Aschegehaltes zeigen, dass es bei deren Verbrennung oftmals zur Bildung eines kompakten schlackenartigen Verbrennungsrückstandes kommt. Diese Versinterungsprozesse mögen eine Ursache dafür sein, dass durch den Primär-Verbrennungsluftstrom Aschebestandteile nicht aus dem Brennstoffbett ins Abgas gelangen und eine Erhöhung der Gesamtstaubkonzentration bewirken können.

Die Korngrößenverteilung der Partikelemissionen bei der Brennstoffqualität VII) (gemessen bei Nennleistung der Feuerungsanlage) bestätigt die Erkenntnisse und die Ergebnisse aus der Verbrennung nicht aufbereiteter Brennstoffe: Auch bei aufbereiteten Brennstoffen bestehen die emittierten Partikel überwiegend aus Korngrößen kleiner  $0,5\mu\text{m}$ .

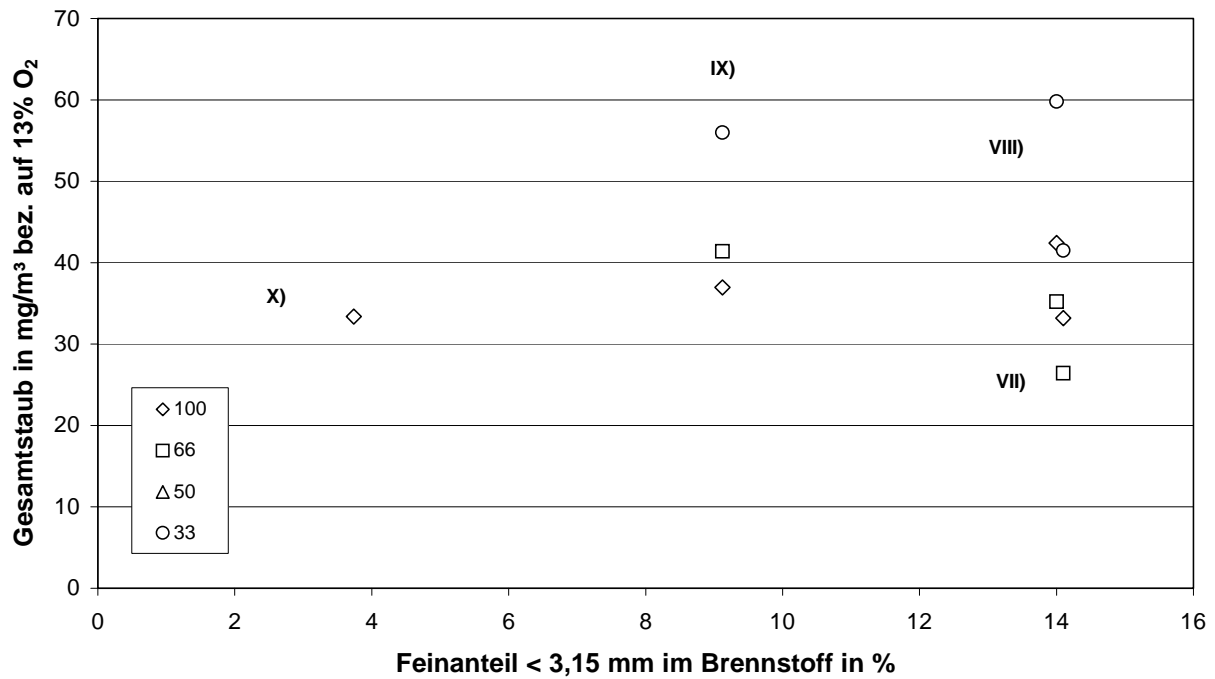


Abbildung 5.25: Gesamtstaub-Konzentration in Abhängigkeit vom Feinanteil < 3,15mm de aufbereiteten Brennstoffe

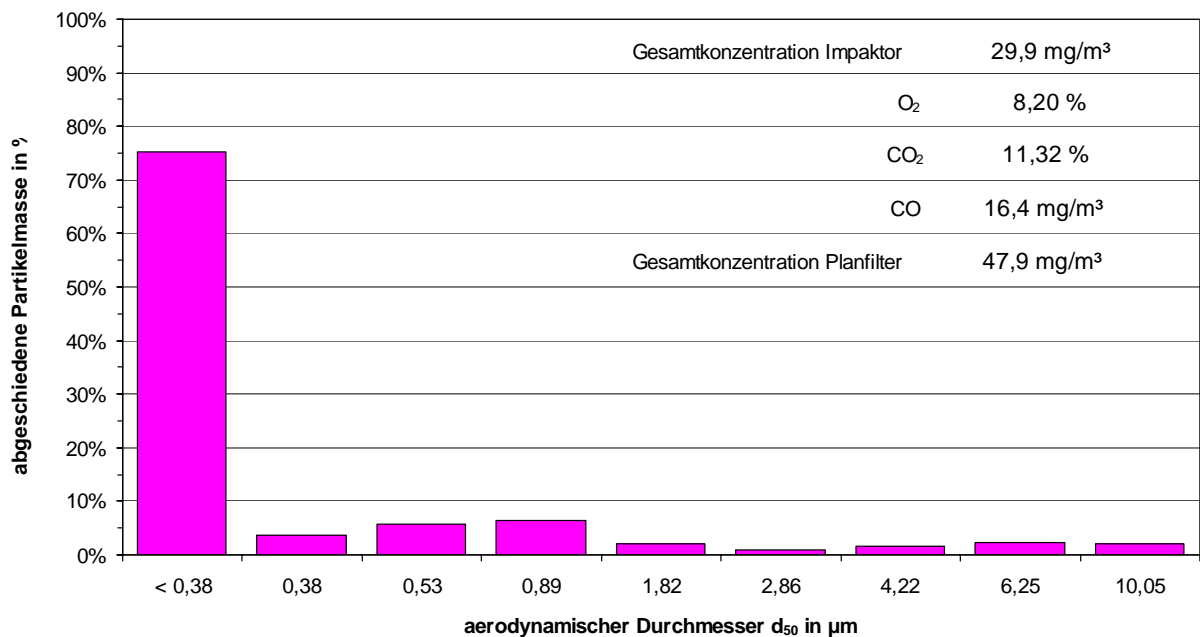


Abbildung 5.26: Korngrößenverteilung der Partikelemissionen bei der Verbrennung der Brennstoffqualität VII) bei Feuerungsnennleistung



Anhand der Ergebnisse, die in den Versuchen mit aufbereiteten Brennstoffen gewonnen wurden, lassen sich die grundlegenden Zusammenhänge zwischen Brennstoffqualität und Emissionen bei der Verbrennung biogener Feststoffe aus der Forstwirtschaft und der Landschaftspflege aufzeigen. Die Emissionen an Produkten unvollständiger Verbrennung sind grundsätzlich vom Lastzustand der Feuerung und vom Wassergehalt des Brennstoffes abhängig.

Der Feinanteil des Brennstoffes als physikalisches Charakteristikum, zeigt keinen unmittelbaren Einfluss auf die auftretenden Gesamtstaubemissionen.

Die Freisetzung von Stickstoffoxiden ist ebenfalls vom Leistungsbereich, in dem die Anlage betrieben wird, abhängig. Darüber hinaus zeigen sich deutliche Zusammenhänge mit dem Stickstoffgehalt des Brennstoffes.

Eindeutige Abhängigkeiten zwischen dem Aschegehalt der Brennstoffe und den Gesamtstaubemissionen können nicht festgestellt werden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sich das Emissionsverhalten der aufbereiteten Brennstoffqualitäten nicht nennenswert von demjenigen der nicht aufbereiteten Brennstoffe unterscheidet. Geringfügig höhere Emissionskonzentrationen sind auf eine nicht optimierte Verbrennungslufteinstellung zurückzuführen. Eine deutliche Verbesserung der Brennstoffeigenschaften zeigt sich nach Maßnahmen, die den Wassergehalt verringern.

## 5.4 Brennstoffe und Emissionsergebnisse aus der Praxis

Am Ende des Vorhabenszeitraumes ergab sich die Möglichkeit, Emissionsuntersuchungen an Holzfeuerungsanlagen durchzuführen, die in verschiedenen Nahwärmenetzen zur Versorgung von großen öffentlichen Gebäudekomplexen und von Wohnsiedlungen betrieben werden. Hierbei kommen Waldholzbrennstoffe sowohl in aufbereiteter als auch in nicht aufbereiteter Form zum Einsatz, weshalb die Untersuchungsergebnisse im Rahmen des vorliegenden Abschlussberichtes berücksichtigt werden sollen.

Es wurden an vier verschiedenen Heizwerken, die Waldholzbrennstoffe nutzen, fünf Messreihen durchgeführt:

- **450 kW-Rostfeuerung mit Gewebefilter in einer Schule – Brennstoff XI)**

Eine Rostfeuerungsanlage mit einer thermischen Heizleistung von 450 kW versorgt ein Schulgebäude im Wärmeverbund mit einem Hallenbad. Dem in die Feuerungsanlage integrierten Multizyklon ist zur Staubabscheidung zusätzlich ein Gewebefilter nachgeschaltet, der über ein automatisches Druckluftabreinigungssystem verfügt. Wenn die Anlage unter Schwachlast betrieben wird, kann es durch erhöhte Kohlenwasserstoffemissionen zu Teerniederschlägen im Filtermaterial und somit zur dauerhaften Beschädigung des Staubabscheiders kommen. Um dies zu vermeiden, wird der Gewebefilter beim Auftreten dieser Betriebszustände im Bypass umfahren. Als regelungstechnische Führungsgröße dient die Abgastemperatur. Die verwendete Brennstoffqualität besteht aus Waldrestholz, das im Rahmen von Pflege- oder Erntemaßnahmen an der Waldstraße vorkonzentriert und seit dem letzten Winter dort in unzerkleinerter Form gelagert und so vorgetrocknet wurde. Durch den besonders warmen und trockenen Sommer des Jahres 2003 konnte auf diese Weise ein außerordentlich niedriger Wassergehalt von 33% erreicht werden. Die Sammlung und Zerkleinerung des Waldrestholzes mit einem mobilen Anbauhacker erfolgte zeitnah zur Lieferung.

- **300 kW-Rostfeuerung mit Multizyklon zur Wärmeversorgung einer Wohnsiedlung - Brennstoff XII) und XIII)**

Eine weitere Holzfeuerungsanlage nach dem Rostverbrennungsprinzip versorgt eine Wohnsiedlung mit Heizwärme. Sie leistet 300 kW und verfügt über einen Multizyklon zur Abscheidung von Partikeln aus dem Abgas. An dieser Anlage wurden zwei Messreihen durchgeführt, die letzte Mitte März 2004 umfasste nur mehr Teillastzustände, da der Wärmebedarf zu Beginn des Frühjahres geringer war als während der kalten Wintermonate. Beide Brennstoffqualitäten bestanden aus Waldrestholz, das in zerkleinerter Form über einen längeren Zeitraum unter Dach

gelagert wurde. Die Brennstoffqualität XII) zeigte einen Wassergehalt von nur 31% , die Qualität XIII) von 36%.

- **1000 kW-Unterschubfeuerung mit Zyklonabscheider und Abgaskondensation für ein Schulzentrum - Brennstoff XIV)**

Zwei Unterschubfeuerungsanlagen mit Heizleistungen von jeweils 1000 kW dienen zur Versorgung eines Schulzentrums mit einer angeschlossenen Mehrzweckhalle. Beide Feuerungsanlagen verfügen jeweils über Zyklonstaubabscheider und werden anschließend in ein gemeinsames Abgaskondensationssystem geführt. Die Brennstoffqualität besteht aus Waldrestholz, das außer der Zerkleinerung mit einem Mobilhacker keine weitere Aufbereitung erfahren hat.

Die drei genannten Feuerungsanlagen verfügen über kesseltemperaturgeführte, moderne Lambda-Regelungen, zum Teil werden Feuerraum- und Abgastemperatur im Regelungskonzept berücksichtigt.

- **125 kW-Unterschubfeuerung in einem Sägewerk - Brennstoff XV)**

Zum Vergleich der Waldholzbrennstoffqualitäten mit naturbelassenen Industrierestholz wurde bei den Felduntersuchungen eine Feuerungsanlage untersucht, in die der eine solche Qualität verbrannt wird. Es handelt sich dabei um Reststoffe eines Sägewerkes bestehend aus mit einem Hacker zerkleinerten Schwarten und Abschnitten, Säge- und Hobelspänen sowie von geringen Anteilen von Rinde. Die Brennstoffqualität XV) stellt eine zufällig nach dem jeweiligen Anfall von Resten entstandene Mischung dar, die zum Teil im Freien gelagert und der Witterung ausgesetzt wurde. Entsprechend hoch ist der Wassergehalt mit fast 59%. Die sogenannten Sägereste wurden in einer 125 kW-Unterschubfeuerung älteren Typs verbrannt, die neben der Kesseltemperatur die Abgastemperatur zur Regelung verwendet. Dieses Konzept entspricht nicht mehr dem Stand der Technik.

Bei den Felduntersuchungen sollten die selben Abgaskomponenten erfasst werden wie bei den Experimenten im Technikum des Instituts. Zu diesem Zweck wurde ein mobiles Abgasmesssystem mit Probengasaufbereitung und Messwerterfassung zusammengestellt und eingesetzt. Die Abbildung 5.27 zeigt die mobile Messtechnik.



Abbildung 5.27:

Mobiles Abgasmeßsystem bei den Felduntersuchungen (im Hintergrund 1000 kW-Unterschubfeuerung)

Neben der Erfassung der gasförmigen Abgasbestandteile wurden ebenfalls wieder Gesamtstaub- und Impaktormessungen durchgeführt. An den Anlagen mit sekundären Abgasreinigungssystemen wurden sowohl im Roh- als auch im Reingas Staubmessungen vorgenommen.

Die Abbildung 5.28 zeigt die gemessenen Kohlenmonoxidkonzentrationen in Abhängigkeit von der Anlagenleistung und der Brennstoffqualität. Es zeigen sich die bereits erläuterten Zusammenhänge zwischen dem Leistungsbereich und dem Emissionsniveau als ein von der Feuerungstechnik abhängiger Einflussfaktor. Abhängigkeiten von der Brennstoffqualität, nämlich vom Wassergehalt, zeigen sich auf drastische Weise. Die CO-Emission bei der Verbrennung der Qualität XV) überschreitet den Grenzwert bei weitem. Das Verbrennungsprinzip der Unterschubfeuerung ist für den hohen Wassergehalt dieses Brennstoffes völlig ungeeignet.

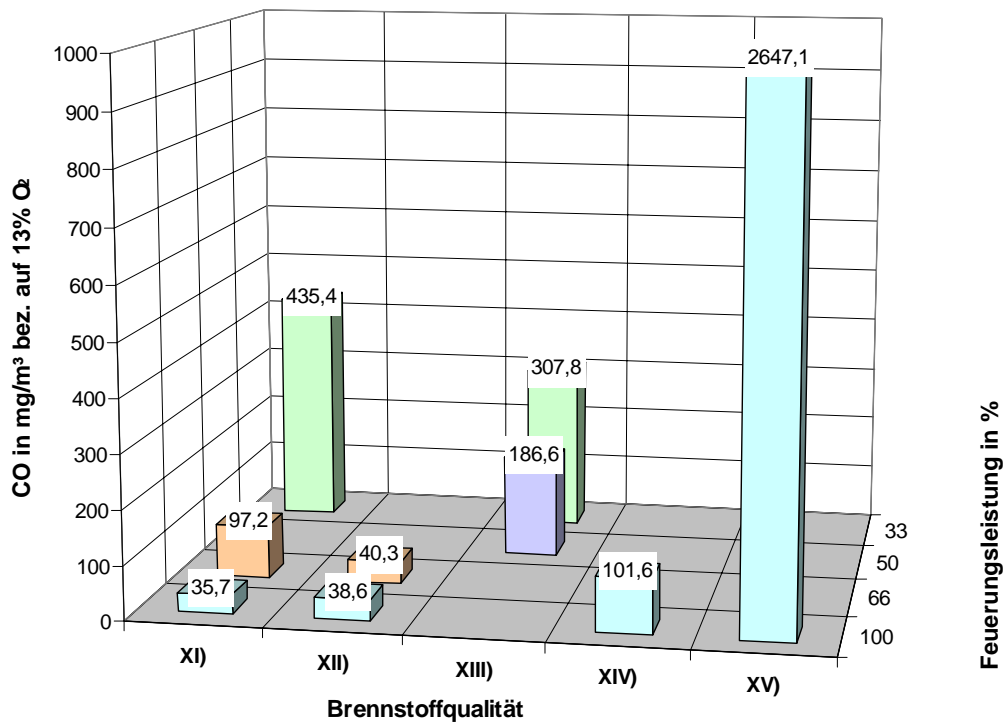


Abbildung 5.28: CO-Emissionen aufbereiteter und nicht aufbereiteter Brennstoffqualitäten – Ergebnisse von Felduntersuchungen

Das Ergebnis der Kohlenwasserstoffmessungen zeigen die gleichen Zusammenhänge. Insgesamt ist festzustellen, dass die Emissionen an Produkten unvollständiger Verbrennung auch bei Feuerungsanlagen im Alltagsbetrieb gering ausfallen. Grenzwertüberschreitungen und damit Belästigungen von Anwohnern sind allenfalls im Schwachlastbereich zu befürchten. Offen bleibt jedoch die Frage, wie oft und über welche Zeiträume solche Betriebszustände niedriger Leistung in der Praxis auftreten.

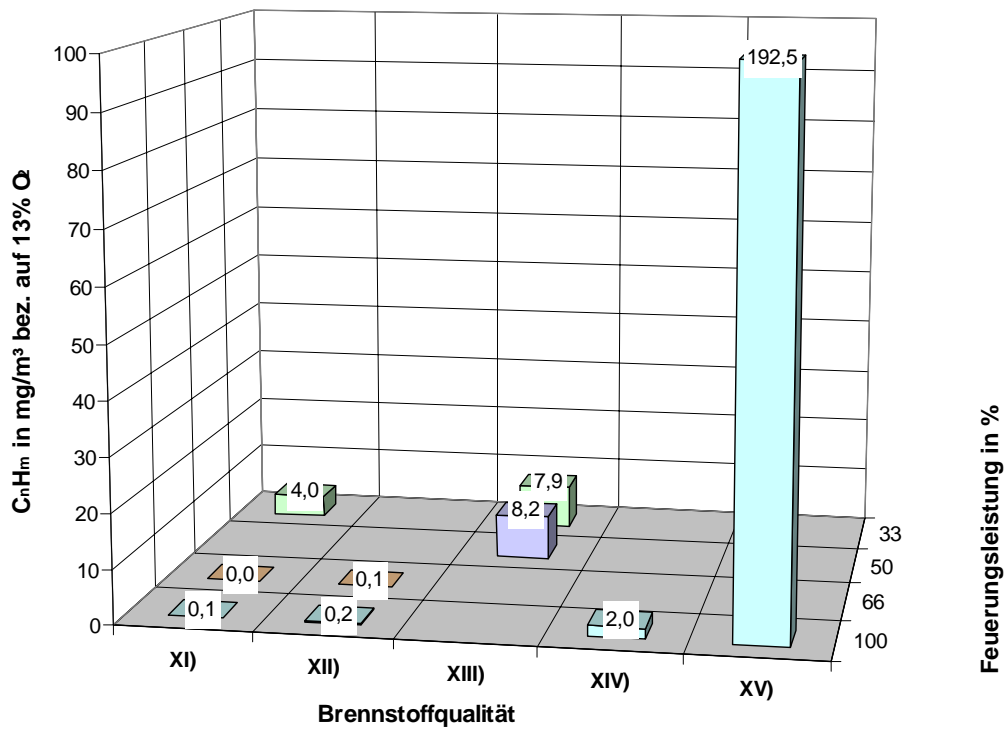


Abbildung 5.29: Gesamtkohlenwasserstoff-Emissionen aufbereiteter und nicht aufbereiteter Brennstoffqualitäten – Ergebnisse von Felduntersuchungen

An den Stickstoffoxid-Konzentrationen der Praxisanlagen in der Abbildung 5.30 fällt auf, dass sie bedeutend niedriger liegen als die Konzentrationen der übrigen Versuchsreihen. Der besonders niedrige Emissionswert der Brennstoffqualität XV) erklärt sich durch die hohe CO-Konzentration. In CO-haltiger Umgebung können Stickstoffoxide in bestimmten Temperaturbereichen reduziert werden.

Ein Vergleich der Brennstoff-Stickstoffgehalte in der Abbildung 4.11 vermag das niedrige NO<sub>x</sub>-Emissionsniveau zu erklären. Die Stickstoffgehalte der Brennstoffe, die während der Felduntersuchungen verbrannt wurden, sind erheblich niedriger als die der Technikumversuche. In der Abbildung 5.31 sind alle gemessenen NO<sub>x</sub>-Werte den Stickstoffgehalten gegenübergestellt. Ungeachtet des Leistungsbereiches in dem die jeweiligen Feuerungsanlagen betrieben wurden, ist der Zusammenhang deutlich erkennbar.

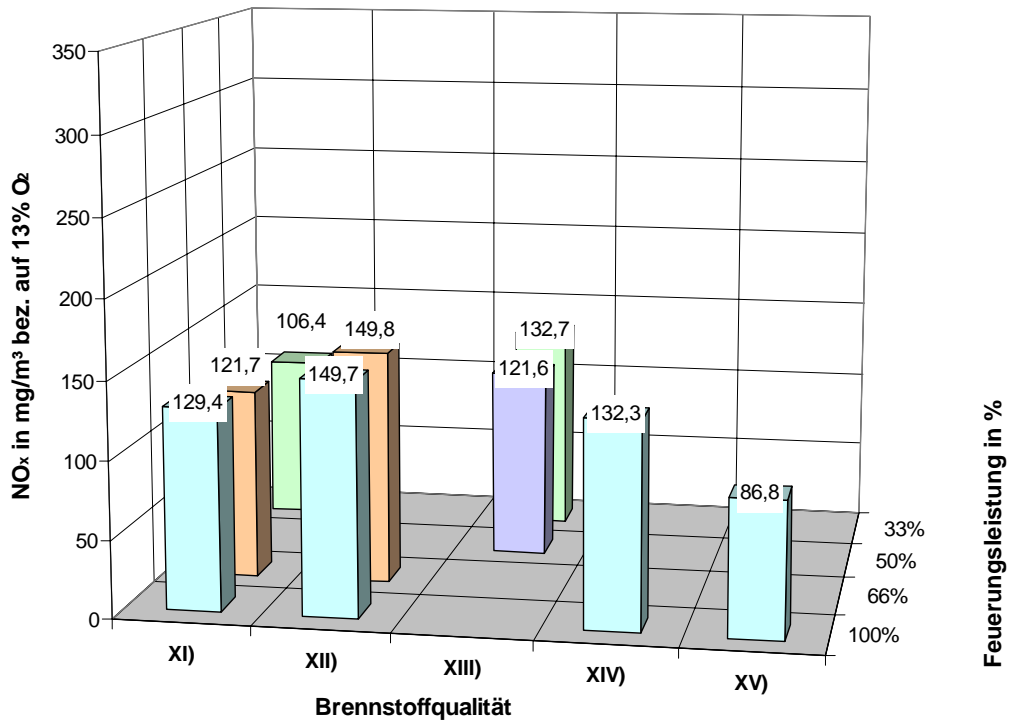


Abbildung 5.30: NO<sub>x</sub>-Emissionen aufbereiteter und nicht aufbereiteter Brennstoffqualitäten – Ergebnisse von Felduntersuchungen

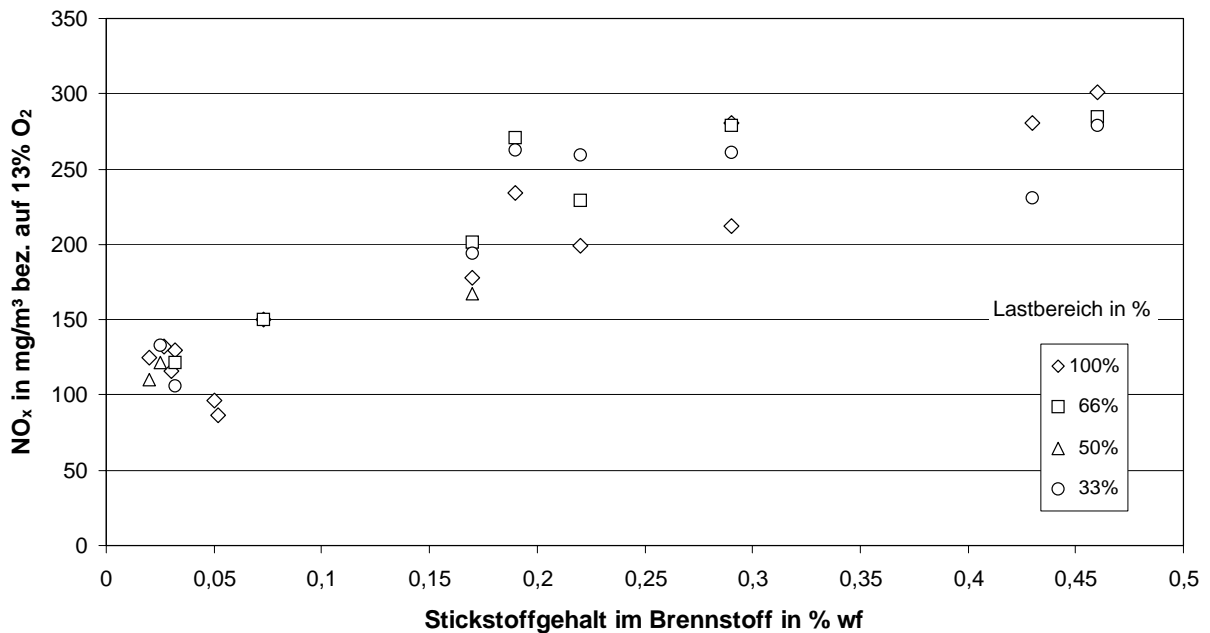


Abbildung 5.31: NO<sub>x</sub>-Emissionen in Abhängigkeit der Brennstoff-Stickstoffgehalte aufbereiteter und nicht aufbereiteter Brennstoffqualitäten von Felduntersuchungen

Die Abbildung 5.32 gibt die Ergebnisse der Gesamtstaubmessungen nach dem Planfilterverfahren wieder. Es ist klar ersichtlich, welche Brennstoffqualitäten in Anlagen verbrannt wurden, die über sekundäre Entstaubungseinrichtungen verfügen. Anhand der ähnlichen Brennstoffqualitäten XII) und XIII), die an der selben Feuerungsanlage untersucht wurden, lässt sich die Lastabhängigkeit der Partikelemissionen erkennen.

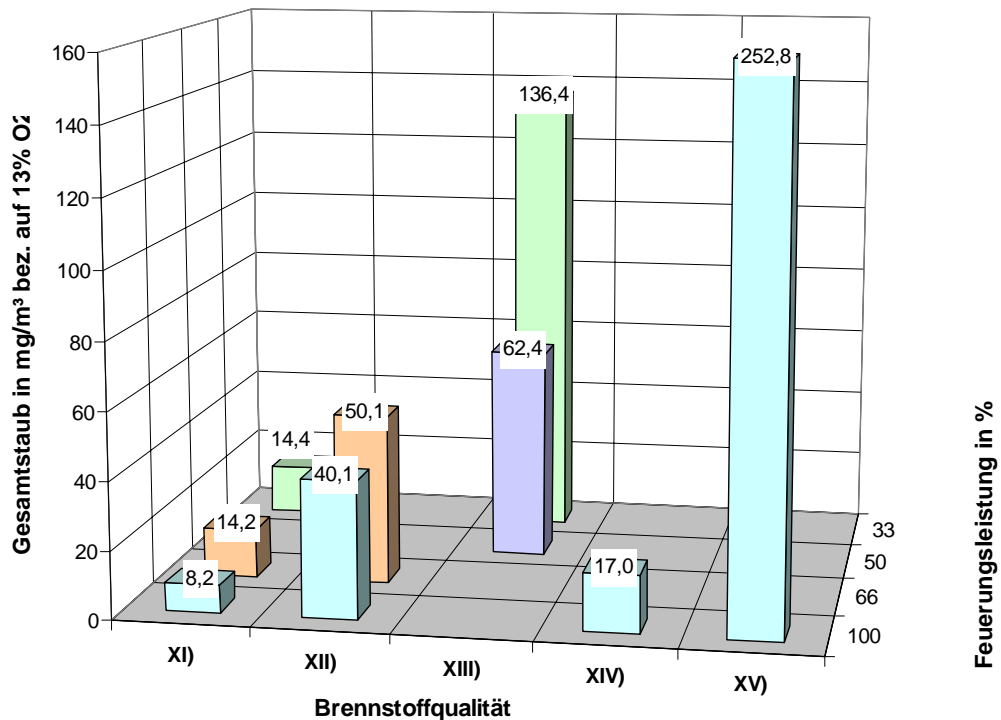


Abbildung 5.32: Gesamtstaub-Emissionen aufbereiteter und nicht aufbereiteter Brennstoffqualitäten – Ergebnisse von Felduntersuchungen

Die besonders hohen Partikelemissionen der Brennstoffqualität XIII) (bei einer Anlagenleistung von 33%) und der Qualität XV) können mit der schlechten Verbrennungsgüte und den hohen Emissionen an Produkten unvollständiger Verbrennung erklärt werden. Der Augenschein der beladenen Filter bestätigte dies. Sie zeigen eine dunkelgraue bis schwarze Färbung und riechen intensiv nach Teer. Große Teile der auf dem Filtermaterial abgeschiedenen Masse bestehen aus Ruß und Kohlenwasserstoff-Kondensaten.

In der Abbildung 5.33 sind alle gemessenen Staubkonzentrationen über den Aschegehalten der verschiedenen Brennstoffe aufgetragen. Die beiden höchsten Staubkonzentrationen brauchen für einen Zusammenhang zwischen den Partikelemissionen und dem Aschegehalt nicht berücksichtigt zu werden, da sie wie erläutert hohe Rußanteile enthalten. Trotzdem ist anhand dieser Gesamtübersicht keine Korrelation zwischen den Gesamtstaubemissionen und den Aschegehalten der untersuchten Brennstoffe erkennbar.



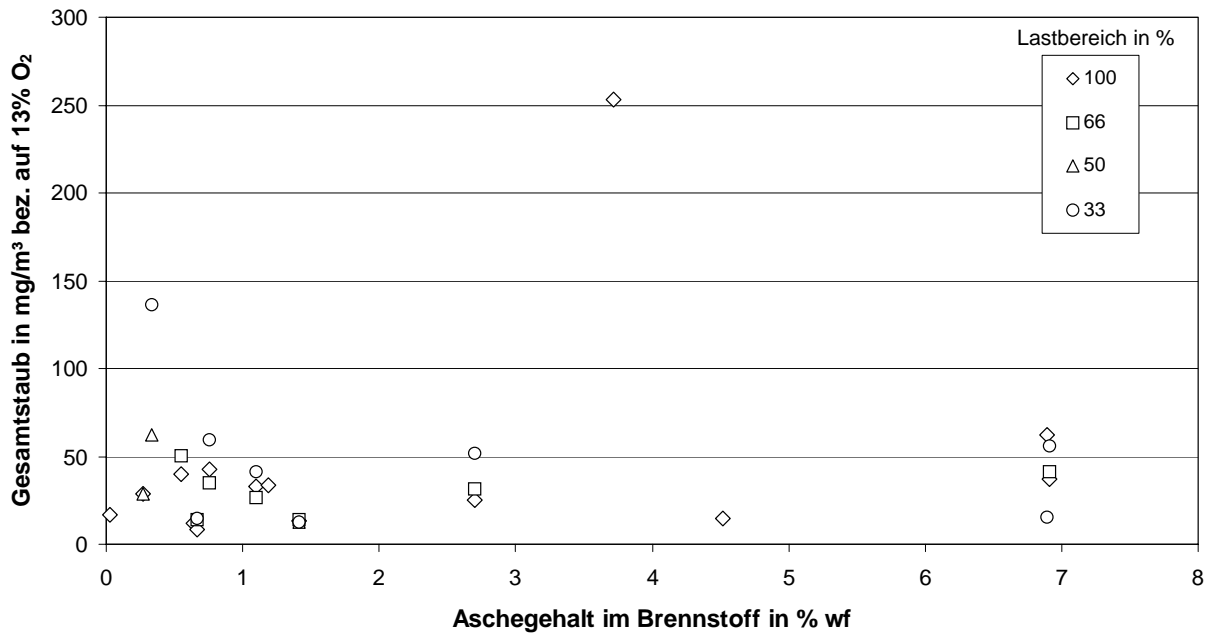


Abbildung 5.33: Gesamtstaub-Emissionen in Abhängigkeit der Brennstoff-Aschegehalte aufbereiteter und nicht aufbereiteter Brennstoffqualitäten von Felduntersuchungen

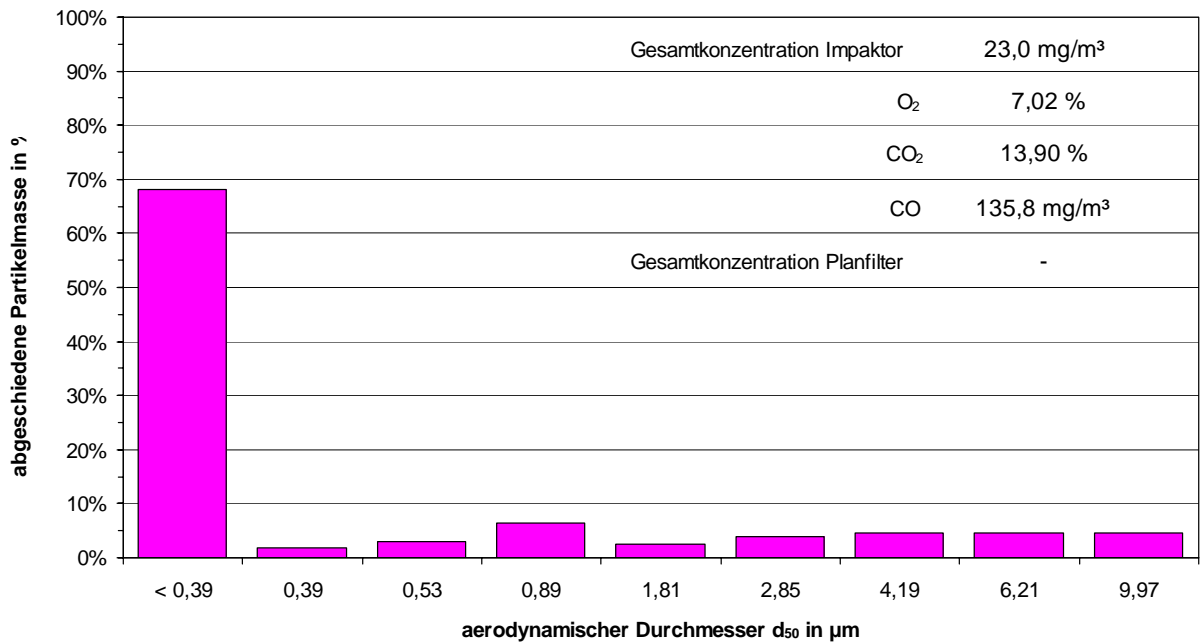


Abbildung 5.34: Korngrößenverteilung der Partikelemissionen bei der Verbrennung der Brennstoffqualität XIII) bei 33% Feuerungsleistung

Die Abbildung 5.34 zeigt die Korngrößenverteilung der Partikelemissionen bei der Verbrennung der Brennstoffqualität XII) im Teillastbetrieb (33%). Es zeigt sich, dass weder die Brennstoffqualität noch der Leistungsbereich der Feuerungsanlage nennenswerten Einfluss auf die Größenverteilung der emittierten Partikel hat.

Die Abbildung 5.35 vergleicht die Abscheidungswirkung der drei untersuchten Entstaubungsapparate, die im Rahmen der Technikumuntersuchungen und der Feldmessungen untersucht werden konnten. Der Multizyklonabscheider der Rostfeuerung ist fest in die Anlage integriert. Der Zugang zur Staubmessung erfolgte über eine seitliche Öffnung zwischen den Kesselzügen und den Zyklonen (vgl. Abb. 5.1). Die Messungen erfolgten zeitgleich. Der Gewebefilter wurde für die Rohgas-Konzentrationsmessung im Bypass umfahren. Die Messungen wurden nacheinander durchgeführt, weil nur ein Zugang zum Abgaskanal bestand. Die Messungen an der Abgaskondensationsanlage wurden simultan vorgenommen.

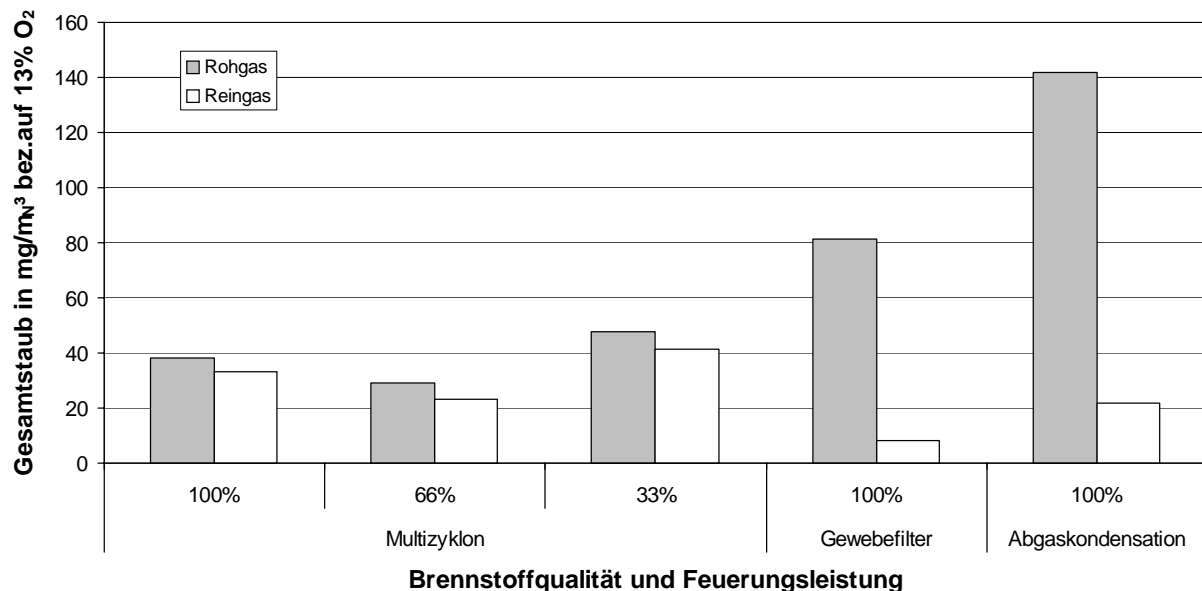


Abbildung 5.35: Abscheidungsgüte verschiedener Partikelabscheidungssysteme

Die Roh- und Reingas-Konzentrationen am Multizyklon zeigen, dass die Abscheidungswirkung dieses Apparates für die Partikel aus Holzverbrennungsprozessen im Grunde unzureichend ist. Die Ergebnisse der korngroßenfraktionierten Staubmessungen verdeutlichen, dass ein hoher Prozentsatz der von Holzfeuerungsanlagen emittierten Partikel kleiner als  $0,5 \mu\text{m}$  ist. In diesem Größenbereich zeigen Zyklone kaum eine Wirkung.

Die Gewebefiltration ist hingegen ein hoch wirksames Verfahren, das jedoch aus den zu Beginn des Kapitels dargelegten Gründen an Holzfeuerungsanlagen nur mit Einschränkungen angewendet werden kann. Eine überraschend gute Abscheidewirkung zeigt die untersuchte Abgaskondensationsanlage.

Die Feldmessungen bestätigen die Erkenntnisse, die in Technikumsversuchen mit aufbereiteten und nicht aufbereiteten Brennstoffqualitäten gewonnen wurden. Abhängigkeiten zwischen physikalisch-chemischen Brennstoffeigenschaften und den Stickstoffoxidemissionen konnten aufgezeigt werden, Zusammenhänge mit den Partikelemissionen waren nicht nachweisbar. Als Hauptinflussfaktor auf die Verbrennungsqualität bestätigt sich der Wassergehalt von Brennstoffen.

Weiter konnte die Wirksamkeit verschiedener Abscheidungsverfahren für Partikel aus dem Abgas von Holzfeuerungsanlagen im Praxisbetrieb aufgezeigt werden. Ein normaler Zyklonabscheider ist zwar preisgünstig, für die Abscheidung der feinen Partikel aus Holzfeuerungen aber kaum wirksam. Elektroabscheider wurden hier nicht untersucht, da sie für den Leistungsbereich unter 1 MW unverhältnismäßig hohe Investitionskosten verursachen.

Schließlich wurden auch Probleme mit der Brennstoffqualität, der Parametrierung der Feuerungstechnik und der Abstimmung von Verbrennungsanlage und sekundärer Abgasreinigungstechnik deutlich.

Ingesamt können anhand der Ergebnisse aus den Felduntersuchungen eine Reihe von praktischen Problemen namhaft gemacht werden, die im täglichen Umgang mit der Holzverbrennung Handlungsbedarf aufwerfen. Dies sind die

- die Auswahl geeigneter Feuerungstechnik auf der Basis zur Verfügung stehender Brennstoffqualitäten,
- die Abstimmung von feuerungstechnischen Parametern auf die zur Verfügung stehende Brennstoffqualität, bzw,
- die Einhaltung einer konstanten Brennstoffqualität, wenn auf häufiges nachjustieren der Anlage verzichtet werden soll und schließlich
- die sorgfältige Kombination von Feuerungs- und Abgasreinigungstechnik, wo sie erforderlich ist.

## **6 Optimierung der Feuerungstechnik**

Die Emissionsuntersuchungen im Technikumsversuch sowie die Feldmessungen haben gezeigt, dass moderne, dem Stand der Technik entsprechende Feuerungsanlagen in der Lage sind, eine breite Palette an Waldholz-Brennstoffqualitäten unter Einhaltung der Umweltvorschriften zu verbrennen. Die genauere Betrachtung der Ergebnisse zeigt jedoch auch eine Reihe von Ansatzpunkten für die konstruktive Optimierung der Holzverbrennungsanlagen.

Im Folgenden soll deshalb der Begriff der Brennstoffqualität genauer erläutert werden, um auf seiner Basis Mindestanforderungen für Waldholzbrennstoffe zu definieren, die eine emissionsarme Nutzung dieser biogenen Festbrennstoffe in einfacher kostengünstiger Feuerungstechnik sicherstellen können. Abschließend soll auf die Schwachpunkte der gängigen Verbrennungsprinzipien, die sich im Laufe der praktischen Untersuchungen gezeigt haben, eingegangen und Verbesserungsvorschläge formuliert werden.

### **6.1 Mindestanforderungen an Waldholzbrennstoffe**

Die physikalische und chemische Analyse der betrachteten Brennstoffe ergab, dass noch vor der chemischen Zusammensetzung und dem Aschegehalt der Wasseranteil das für die thermische Nutzung wichtigste Kriterium der Bewertung von Waldholzbrennstoffen bildet. Die Emissionsergebnisse aus den Versuchen mit nicht aufbereiteten Brennstoffen zeigen jedoch, dass die Verbrennungsgüte über weite Bereiche des Wassergehaltes zufriedenstellend sein kann, wenn die Parameter der jeweilige Feuerungsanlage auf den spezifischen Wassergehalt, oder allgemeiner auf die Brennstoffqualität hin abgestimmt sind.

Dies bedeutet, dass eine hierarchische Brennstoffklassifizierung, wie sie der Normenentwurf der CEN vorschlägt, zur Erreichung niedriger, vorschrittskonformer Emissionsergebnisse nicht zwingend erforderlich ist. Viel wichtiger ist es, ob eine Brennstoffqualität, auf die hin eine Feuerungsanlage durch eine sorgfältige Abstimmung von Luft- und Brennstoffströmen optimiert ist, über den gesamten Betriebszeitraum der Anlage zur Verfügung gestellt werden kann. Am Beispiel des Wassergehaltes bedeutet dies, dass dieser sich in einem Fenster von wenigen Massenprozent um einen Referenzgehalt bewegen sollte.

Der Qualitätsbegriff sollte sich also im Zusammenhang mit biogenen Festbrennstoffen an den Erfordernissen der zur Verfügung stehenden Feuerungstechnik orientieren. Die Mindestanforderungen an Waldholzbrennstoffe ergeben sich dann aus den technischen Möglichkeiten der gängigen Verbrennungsprinzipien:

Für Waldholzbrennstoffe kommen nach dem gegenwärtigen Stand der Technik zwei Verbrennungsprinzipien zur thermischen Nutzung im Leistungsbereich bis 1 MW in Frage.

Die **Rostfeuerung**, wie sie in der Abbildung 5.1 dargestellt ist, ist das klassische Verbrennungsprinzip für feste Brennstoffe. Der Energieträger wird dabei auf dem Rost verteilt und von unten mit Primärluft versorgt. Die Durchströmung der Brennstoffschüttung mit Verbrennungsluft ermöglicht eine konvektive Trocknung, wodurch sich das Prinzip besonders für wasserhaltige Brennstoffe eignet. Begrenzender Faktor für die Regelbarkeit der Anlagenleistung ist die für eine vollständige und emissionsarme Verbrennung erforderliche gleichmäßige Bedeckung des Rostes mit Brennstoff. Eine geringere Anlagenleistung ist mit einer niedrigeren Brennstoff-Bethöhe verbunden. Lücken im Brennstoffbett können sich bilden und verändern an dieser Stelle die Druckverhältnisse für die ausströmende Primärluft. Das Bett wird unzulänglich durchströmt und die Emissionen steigen an. Die Größenverteilung des Brennstoffes hat Einfluss auf die gleichmäßige Rostbedeckung und damit auf die Emissionen. Hinsichtlich des Aschegehaltes bestehen keine Beschränkungen, jedoch sollte die Feuerungsanlage über eine automatische Entaschung z.B. in Form einer Austragsschnecke verfügen. Die chemische Zusammensetzung spielt im Hinblick auf die Neigung zur Verschlackung und Verschmutzung des Feuerraumes eine Rolle, hohe Brennstoffstickstoffgehalte sind bei Waldholzqualitäten die Ausnahme und können durch Abgasrezirkulationssysteme abgefangen werden.

Die **Unterschubfeuerung** ist eine neuere Entwicklung, die vorrangig für trockene Waldholzqualitäten Anwendung findet. Die Zuführung transportiert den Brennstoff von unten in eine häufig als Mulde oder Muffel bezeichnete trichterförmige Brennerkonstruktion. In der Regel werden hierzu Schneckenfördersysteme eingesetzt, die wie bereits geschildert keine großen Brennstoffstücke vertragen. Werden zur Zerkleinerung Schredder eingesetzt, so ist eine Klassierung erforderlich. In der Nähe der Oberfläche des Brennstoffbettes wird Primärluft durch die Brennstoffschüttung zugegeben. Eine Trocknung, wie im vorigen Abschnitt beschrieben, ist nur in sehr eingeschränktem Maß möglich da Trocknung und thermische Zersetzung hier zeitlich und räumlich nicht getrennt stattfinden können. Das Prinzip eignet sich gut für Qualitäten mit höheren Aschegehalten, eine automatische Entaschung ist von Vorteil. Die experimentellen Untersuchungen haben ein beträchtliches NO<sub>x</sub>-Minderungspotenzial durch eine Abgasrezirkulation aufgezeigt. Die Vorteile dieses Verbrennungsprinzips liegen in der einfacheren und kostengünstigeren Technik. Sie wird auch für kleine Leistungsbereiche unter 100 kW angeboten, stellt aber insgesamt höhere Anforderungen an den Wassergehalt und, bedingt durch die Brennstoffbeschickung mit Schneckenförderern, an die Größenverteilung des Brennstoffes.

Mindestanforderungen für die Brennstoffqualität ergeben sich also in erster Linie aus dem Wassergehalt. Je nach der eingesetzten Feuerungs- und Zerkleinerungstechnik ist eine Klassierung notwendig. Beim Einsatz von Landschaftspflegeholz ist je nach Herkunft eine Fremdstoffabscheidung in Form einer Metallabscheidung oder einer Sichtung dringend geboten. Die Tabelle 6.1 gibt eine Übersicht über Mindestanforderungen an chemisch-physikalische Eigenschaften und notwendige Aufbereitungsverfahren.

Tabelle 6.1: Mindestanforderungen an Waldholzbrennstoffe

<b>Feuerungstechnik</b>	<b>Rostfeuerung</b>	<b>Unterschubfeuerung</b>
<i>Brennstoffanforderungen</i>		
Wassergehalt	30 – 50 %	5 – 45%
Aschegehalt	keine/automat. Entaschung	keine/automat. Entaschung
N-Gehalt	keine/Abgasrezirkulation	keine/Abgasrezirkulation
<i>Aufbereitungsverfahren</i>		
Zerkleinerung	Hacker oder Schredder	Hacker oder Schredder
Klassierung	bei Landschaftspflegeholz Fremdstoffabscheidung	bei geschreddertem Holz

## 6.2 Optimierungspotenziale der Feuerungstechnik

Obwohl die Emissionsergebnisse mit den untersuchten Brennstoffqualitäten insgesamt sehr zufriedenstellend ausfielen, zeigten sich bei den Versuchen einige konstruktive und konzeptionelle Schwachpunkte der Feuerungstechnik. Im Kapitel 5.1 wurde dargelegt, dass das Rostbewegungssystem in Abhängigkeit seiner Einstellparameter die Verbrennungsbedingungen und damit das Emissionsverhalten von Rostfeuerungsanlagen erheblich stören kann. Die zeitlichen Konzentrationsverläufe in der Abbildung 5.5 verdeutlichen, dass selbst über Zeitbereiche konstanter Anlageneinstellung keine stationären Verbrennungsbedingungen zustande kommen. Dies zeigt, dass für das System von Brennstoffzuführung und -verteilung auf dem Rost noch Optimierungsbedarf besteht. Die Erzeugung eines gleichmäßigen Brennstoffbettes erweist sich gerade bei Feuerungsanlagen kleiner Leistung als schwierig. Während im größeren Leistungsbereich aufwendige Brennstoffzuführungssysteme wie mehrere parallel arbeitende und getrennt regelbare Zuführungsschnecken oder hydraulische Einschubsysteme mit gutem Erfolg eingesetzt werden, werden sie im kleinen Leistungsbereich aus Kostengründen nicht angeboten.

Ein Zusammenhang zwischen der Ausbildung eines geschlossenen Brennstoffbettes und den Gesamtstaubemissionen konnte nur anhand der Primärverbrennungsluftströme nachgewiesen werden, jedoch bilden die Staubemissionen den entscheidenden Ansatzpunkt zur Weiterentwicklung auf eine kostengünstige, effiziente Holzverbrennungsanlage hin, die ohne nachgeschaltetes Partikelabscheidungssystem auskommt.

Den zweiten Ansatzpunkt zu konstruktiven Verbesserungen am Rostverbrennungsprinzip bildet die Verbrennungsluftführung insbesondere der Rostluft, die neben der Vortrocknung des Brennstoffes auch den heterogenen Ausbrand des fixen Kohlenstoffanteils sicherstellen soll. Sie ist eng mit den vorangehend beschriebenen Problemen gleichmäßiger Brennstoffbettausbildung verbunden. Rostsysteme mit getrennt regelbaren Verbrennungszonen zeigen einen vielversprechenden Verbesserungsweg auf, die Anpassung an den Wassergehalt des Brennstoffes bleibt jedoch meistens der Erfahrung von Bedienungs- und Servicepersonal überlassen. Sensorsysteme für den Wassergehalt von Brennstoffen könnten in der Brennstoffzuführungsanlage installiert werden und so eine zusätzliche Führungsgröße für die Primärlufteinstellung bereitstellen. Sie befinden sich gegenwärtig aber erst in der Entwicklung.

Die Felduntersuchungen bestätigen die Zusammenhänge zwischen der Ausbildung eines geschlossenen Brennstoffbettes und der Anpassung der Primärluft. Die Rostfeuerungsanlage mit dem Gewebefilter als Partikelabscheidesystem wurde bei einer relativ trockenen Brennstoffqualität ( $w=33\%$ ) mit maximalem Primärluftstrom betrieben. Durch aus dem Brennstoffbett ausgetragene Partikel stieg der Druckverlust am Gewebefilter im Zeitraum von ca. 90 bis 120 Sekunden um

4 bis 5 mbar an (nach Überschreitung des Schaltpunktes bei  $\Delta p=8,5$  mbar erfolgte eine automatische Abreinigung des Filtergewebes mit Druckluft), was der Abgassaugzug durch eine Erhöhung der Drehzahl zu kompensieren suchte. Ergebnis war eine im oben genannten Intervall oszillierende Gebläsedrehzahl, die mit erheblichen Geräuschemissionen verbunden war.

Diese Beobachtung aus der Praxis zeugt einerseits von einer mangelhaften Abstimmung von Brennstoffqualität und den Parametern der Verbrennungstechnik, die durch die Änderung des Wassergehaltes von einer Brennstoffcharge zur nächsten hervorgerufen wurde. Hier bietet sich ein Sensorsystem zur Detektion des Wassergehaltes an. Zum anderen zeigt sich eine unglücklich konzipierte Anbindung eines sekundären Abgasreinigungssystems an eine Feuerung.

## 7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

In dem hier beschriebenen Projekt wurde das Spektrum an Waldholzbrennstoffen in Baden-Württemberg nach Herkunft, physikalischer und chemischer Beschaffenheit erfasst, sowie laboranalytisch und in Verbrennungsversuchen untersucht. Europäisch vereinheitlichte und zum Teil im Rahmen der europäischen Normungsarbeit des CEN neu entwickelte Analysemethoden kamen dabei zum Einsatz. Die Ergebnisse zeigen, dass eine thermische Nutzung bereits im nicht aufbereiteten Zustand unter Einhaltung der geltenden Emissionsvorschriften möglich ist. Das Hauptproblem im Zusammenspiel von Brennstoffqualität, Feuerungstechnik und Abgasemissionen besteht nicht in der Notwendigkeit, eine bestimmte, nach Wasser-, Aschegehalt und chemischer Zusammensetzung scharf definierte Brennstoffqualität in bestimmter Feuerungstechnik einsetzen zu müssen, sondern darin, eine Qualität auf welche die feuerungstechnischen Parameter hin abgestimmt wurde, über einen möglichst langen Zeitraum bereitzustellen. Der Qualitätsbegriff hat sich somit an der zeitlichen Konstanz und weniger an absoluten chemischen und physikalischen Eigenschaften zu orientieren.

Für die Brennstoffaufbereitung bedeutet dies, dass sie sich auf wenige einfache und kostengünstig realisierbare Verfahren beschränken kann. Als wichtigste Brennstoffeigenschaft stellt sich einmal mehr der Wassergehalt heraus. Methoden zu seiner Minderung bieten sich bereits beim Anfall der Grundstoffe in der Forstwirtschaft und in der Landschaftspflege an. Die saisonale Lagerung in unzerkleinerter Form im Bestand, an der Rückegasse, der Waldstraße oder auf dem kommunalen Sammelplatz sind hier zu nennen.

Die Lagerung und Trocknung in zerkleinerter Form ist möglich und effektiv, jedoch vergleichsweise kostenintensiver und immer dort mit Risiken durch biologische Aktivität verbunden, wo sie in geschlossenen Hallen oder in unbelüfteten Haufen erfolgt. Aktive Trocknungsverfahren sind nur im Ausnahmefall rentabel und zwar dort, wo Abwärme zur Verfügung steht und Geruchsbelästigungen nicht zu befürchten sind.

Klassierungsprozesse sind notwendig, wo die verwendete Zerkleinerungstechnik eine breite Größenverteilung liefert (Zerkleinerung mit Schreddern) und wo der Grundstoff einen signifikanten Anteil an Fremdstoffen enthalten kann (z.B. Landschaftspflegeholz von kommunalen Sammelplätzen).

Die Herstellung von Verschnittqualitäten ermöglicht grundsätzlich die gezielte Beeinflussung von Brennstoffeigenschaften wie Wassergehalt, Heizwert, Asche- oder auch Stickstoffgehalt. Die Mischung erfordert jedoch einige Erfahrung, wenn auf labortanalytische Charakterisierung verzichtet werden soll. Diese Aufbereitungsform wird gegenwärtig erst vereinzelt praktiziert. Sie



eröffnet weitreichende Möglichkeiten zur Nutzung des gesamten Spektrums am Waldrestholz, besonders im Hinblick auf Rindenqualitäten, die in forstwirtschaftlichen Aufarbeitungsprozessen durch die Entrindung im Wald an der Rückegasse oder der Waldstraße bereits vorkonzentriert anfallen, gegenwärtig aber aufgrund ihres hohen Wassergehaltes nicht genutzt werden.

Zum Schluss muss festgestellt werden, dass vor dem Hintergrund eines mäßigen Preisniveaus für Waldholzbrennstoffe nur solche Aufbereitungsmethoden in Frage kommen, die mit geringem Kostenaufwand zu realisieren sind. Selbst Verfahren und Anlagentechniken, wie sie gegenwärtig zur Aufbereitung von Landschaftspflegeholz eingesetzt werden, sind nur rentabel, weil ein Teil der Kosten, die sie verursachen, über die Entsorgung dieser Stoffe finanziert wird.

## 8 Literaturliste

- [1] Fachgespräch an der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden Württemberg
- [2] Weber, H. (Hrsg.): Handbuch der Forstwirtschaft, 2. Bd. Produktionslehre (Dieterich, V.), Springer-Verlag, Berlin 1925, S 520
- [3] Homepage der Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden Württemberg
- [4] Europäischer Normentwurf „Fuel Specification, Classes and Quality Assurance“, CEN TC 335 WG2
- [5] Becher, S.; Frühwald, A.; Kaltschmitt, M.: CO<sub>2</sub>-Substitutionspotenziale und CO<sub>2</sub>-Minderungskosten einer energetischen Nutzung fester Biomasse in Deutschland, BWK 47 (1995), ½, S. 33-38
- [6] Norling, Ö.: Fuel Characteristics of Wood Biomass in “Biomasse als Festbrennstoff” Schriftenreihe nachwachsende Rohstoffe, Band 6; Landwirtschaftsverlag Münster 1996
- [7] Hartmann,H.; Madeker,U.: Der Handel mit biogenen Festbrennstoffen, Landtechnik-Bericht Heft 28, Landtechnik Weihenstephan, 1997
- [8] Wittkopf, S.: Bereitstellung von Waldhackschnitzeln, LWF-Merkblatt Nr.10, Bayerische Landesanstalt für Wald- und Forstwirtschaft 2002
- [9] Brusche, R.: Hackschnitzel aus Schwachholz, KTBL-Schrift 290, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft., Darmstadt-Kranichstein
- [9] Hartmann, H.: Ernte und Aufbereitung , In: Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren, Springer-Verlag, Berlin 2001
- [10] Gustafson, G.: Artificial Drying of Wood Chips for Energy Purposes, In: Beyond the Energy Crisis – Opportunity and Challenge. Third International Conference on Energy Use Management, 26-30 Oct 1981 in Berlin, 1981

- [11] Kofman, P.D.: Influence of Storage and Drying on the Quality of Wood Fuels, In: Eigenschaften biogene Festbrennstoffe – Bestimmung, Beeinflussung, Standardisierung. Verlag der Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe 2001
- [12] Terlecki-Brunnbauer, M.: Trocknung von Hackschnitzeln mittels Abwärme, Österreichisches Kuratorium für Landtechnik und Landesentwicklung, Wien 1997
- [13] Kaier, U.: Pelleterzeugung in der Praxis, Vortrag, 2. Industrieforum Holzenergie, Stuttgart 23.9.2002
- [14] DIN 51 718: Prüfung fester Brennstoffe – Bestimmung des Wassergehaltes, Beuth-Verlag, Berlin 1978
- [15] Seifert, H.: Thermische Abfallbehandlung, Vorlesungsmanuskript, Universität Stuttgart 1997
- [16] Baumbach, G.: Luftreinhaltung, Springer-Verlag, Berlin 1990
- [17] Siegle, V.: Biogene Brennstoffe in Aufbereitung und Verbrennung, Reihe Energietechnik, Shaker-Verlag 2000
- [18] Zuberbühler, U.; Struschka, M.; Baumbach, G.: Feinstaubuntersuchungen an Holzfeuerungen, IVD-Bericht Nr. 44, Universität Stuttgart 1999
- [19] DIN 51 731: Prüfung fester Brennstoffe – Presslinge aus naturbelassenem Holz, Beuth-Verlag, Berlin 1996
- [20] Ö-Norm M 7315: Presslinge aus naturbelassenem Holz – Holzpellets, Österreichisches Normungsinstitut, Wien 2002