



Berichte aus dem TFZ

Untersuchungen zum Feinstaubausstoß von Holzzentralheizungs- anlagen kleiner Leistung



Untersuchungen zum Feinstaubausstoß von Holzzentralheizungsanlagen kleiner Leistung



Untersuchungen zum Feinstaub- ausstoß von Holzzentralhei- zungsanlagen kleiner Leistung

**Partikelgrößenverteilungen, Gesamtstaub und
weitere Kenngrößen**

Dr. Hans Hartmann
Dipl.-Ing. (FH) Volker Schmid
Dipl.-Ing. (FH) Heiner Link

Berichte aus dem TFZ 4

Straubing, 2003

Titel: Untersuchungen zum Feinstaubausstoß von Holzcentralheizungsanlagen kleiner Leistung

Autoren: Dr. Hans Hartmann
Dipl.-Ing. (FH) Volker Schmid
Dipl.-Ing. (FH) Heiner Link

in Kooperation mit: Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD) der Universität Stuttgart

Auftraggeber: Umweltbundesamt Berlin (UBA), im Unterauftrag durch das Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD) der Universität Stuttgart

Der vorliegende Bericht stellt einen thematisch abgegrenzten und eigenständigen Auszug aus einem Gesamtbericht dar, der mit dem oben genannten Projektpartner (Koordinator) für das Umweltbundesamt erarbeitet wurde (Forschungsbericht Nr. 299 44 140, UBA-FB 000477). Der Gesamtbericht mit dem Titel „Ermittlung und Evaluierung der Feinstaubemissionen aus Kleinfeuerungsanlagen im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher sowie Ableitung von geeigneten Maßnahmen zur Emissionsminderung“ ist in der UBA-Schriftenreihe "Texte" (41/03) erhältlich.
Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

© 2005
Technologie- und Förderzentrum (TFZ)
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, Straubing

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

ISSN: 1614-1008

Hrsg.: Technologie- und Förderzentrum (TFZ)
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe
Schulgasse 18, 94315 Straubing

E-Mail: poststelle@tfz.bayern.de
Internet: www.tfz.bayern.de

Redaktion: Dr. H. Hartmann
Verlag: Eigenverlag TFZ
Erscheinungsort: Straubing
Erscheinungsjahr: 2005
Gestaltung: Dr. H. Hartmann, H. Sporrer

Titelbild: TFZ (Blick in den Abgasstutzen einer Holzfeuerung)

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis		5
Abbildungsverzeichnis.....		7
Tabellenverzeichnis		9
1 Einleitung		11
2 Zielsetzung		13
3 Methodisches Vorgehen.....		15
3.1 Versuchsprogramm (Übersicht).....		15
3.2 Beschreibung der Feuerungsanlagen		16
3.2.1 Stückholzkessel "modern"		17
3.2.2 Stückholzkessel "alte Technik"		19
3.2.3 Hackgutkessel		21
3.2.4 Pelletkessel		22
3.3 Versuchsbrennstoffe		24
3.4 Versuchsaufbau und Messanordnung		25
3.5 Mess- und Analyseverfahren		26
3.5.1 Feuerungs- und Emissionsmessgrößen.....		26
3.5.2 Brennstoffparameter		34
3.6 Versuchsdurchführung		34
3.6.1 Inbetriebnahme und Vorversuche		34
3.6.2 Durchführung der Verbrennungsversuche.....		34
3.7 Auswertung der Abgas- und Feinstaubuntersuchungen.....		37
3.7.1 Abgas		37
3.7.2 Feinstaub und Gesamtstaub		37
3.7.3 Brennstoffe		39
4 Ergebnisse und Diskussion		41
4.1 Einfluss auf Standardemissionsgrößen (CO, VOC, Gesamtstaub)		41
4.1.1 Anlagentechnologie- und Laststufeneinfluss.....		41
4.1.2 Entwicklungsstand.....		44
4.1.3 Brennstoffwassergehalt		45
4.2 Einfluss auf die Partikelgrößenverteilung der Staubemission		46
4.2.1 Anlagentechnologie- und Laststufeneinfluss.....		47
4.2.2 Entwicklungsstand		50
4.2.3 Brennstoffwassergehalt		51
5 Zusammenfassung.....		53
6 Quellenverzeichnis		55

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schematische Darstellung des Stückholzkessels FHG Turbo 3000 (Fröling)	17
Abbildung 2:	Schematische Darstellung des Wärmetauscherkessels SL 33; hier mit Vorofen	19
Abbildung 3:	Schematische Darstellung d. Hackgutkessels HSK-RA-50 (Heizomat).....	21
Abbildung 4:	Schematische Darstellung des Pelletkessels BIOSTAR 15 (Fischer Guntamatic)	24
Abbildung 5:	Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus und der Messstellenanordnung mit Abgasführung	26
Abbildung 6:	Schematische Darstellung des Messgeräteaufbaus auf dem Prüfstand der Landtechnik Weihenstephan	28
Abbildung 7:	Partikelflugbahn.....	31
Abbildung 8:	Trennlinien der Impaktorstufen (S) [1].....	32
Abbildung 9:	Schematische Darstellung des Kaskadenimpaktors (Fa. Andersen, Typ Mark III) [1].....	32
Abbildung 10:	Kohlenmonoxid- und Gesamtstaubemission bei den drei Holzfeuerungen moderner Bauart. NWL: Nennwärmeleistung (Scheitholzkessel: 30 kW, Hackgutkessel: 50 kW, Pelletkessel: 15 kW), MWL mittlere Wärmeleistung (hier: 33 bzw. 10 kW), KWL kleinste Wärmeleistung (hier 16, 14 bzw. 5 kW).....	43
Abbildung 11:	Kohlenmonoxid- und Gesamtstaubemission bei den Scheitholzkesseln moderner und alter Bauart. NWL: Nennwärmeleistung ("modern": 30 kW, "alte Technik": 33 kW) KWL kleinste Wärmeleistung (hier: 16 bzw. 24 kW)	45
Abbildung 12:	Kohlenmonoxid- und Gesamtstaubemission bei unterschiedlichen Brennstoffwassergehalten in der untersuchten Hackgutfeuerung. NWL: Nennwärmeleistung (50 kW), MWL mittlere Wärmeleistung (hier: 33 bzw. 31 kW), KWL kleinste Wärmeleistung (hier: 13 bzw. 14 kW)	46
Abbildung 13:	Verteilungssummenkurven der gemessenen Partikelkollektive bei den drei Holzfeuerungen moderner Bauart. NWL Nennwärmeleistung (Scheitholzkessel: 30 kW, Hackgutkessel: 50 kW, Pelletkessel: 15 kW), MWL mittlere Wärmeleistung (hier: 33 bzw. 10 kW), KWL kleinste Wärmeleistung (hier 16, 14 bzw. 5 kW).....	48
Abbildung 14:	Feinstaubemission moderner Holzfeuerungen, unterschieden nach Partikelgrößenklassen. Messungen bei Nennwärmeleistung mit trockenen Brennstoffen ($w < 15\%$)	50
Abbildung 15:	Verteilungssummen der gemessenen Partikelkollektive bei den Scheitholzkesseln moderner und alter Bauart. NWL Nennwärmeleistung ("modern": 30 kW, "alte Technik": 33 kW), KWL kleinste Wärmeleistung (hier: 16 bzw. 24 kW)	51

Abbildung 16: Verteilungssummen der gemessenen Partikelkollektive bei unterschiedlichen Brennstoffwassergehalten in der untersuchten Hackgutfeuerung. NWL Nennwärmeleistung (50 kW), MWL mittlere Wärmeleistung (hier: 33 bzw. 31 kW), KWL kleinste Wärmeleistung (hier: 13 bzw. 14 kW).....	52
--	----

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Versuchsplan.....	16
Tabelle 2:	Für die Messungen ausgewählte Feuerungsanlagen	17
Tabelle 3:	Anlagentechnische Merkmale des Stückholzkessels FHG Turbo 3000	18
Tabelle 4:	Anlagentechnische Merkmale des Wärmetauscherkessels SL 33 (HDG)	20
Tabelle 5:	Anlagentechnische Merkmale d. Hackgutfeuerung HSK-RA 50 (Heizomat)	22
Tabelle 6:	Anlagentechnische Merkmale des Pelletkessels BIOSTAR 15	23
Tabelle 7:	Brennstoffparameter zum Zeitpunkt der Feuerungsversuche	24
Tabelle 8:	Kontinuierlich erfasste Messgrößen – Technische Daten der Messgeräte	29
Tabelle 9:	Gemessene Laststufen und Lastschwankungen bei den Wiederholungen. NWL: Nennwärmeleistung; MWL mittlere Wärmeleistung; KWL kleinste Wärmeleistung	36
Tabelle 10:	Elementgehalte der verwendeten Brennstoffe	39
Tabelle 11:	Übersicht über die Messergebnisse zu den Emissionsparametern CO, VOC und Gesamtstaub. NWL Nennwärmeleistung, MWL mittlere Wärmeleistung, KWL kleinster Wärmeleistung	41
Tabelle 12:	Anteile der im Impaktor abgeschiedenen aerodynamischen Partikeldurchmesser bis 1, 2,5 bzw. 10 μm (PM_1 , $\text{PM}_{2,5}$, PM_{10}). Dargestellt sind die Mittelwerte für die Versuchsvarianten aus jeweils zwei Messungen.....	47

1 Einleitung

Zu den wesentlichen Emissionskenngrößen von Holzfeuerungen zählt der Partikelausstoß. Im Vergleich zu den fossilen Energieträgern Erdgas oder Heizöl ist bei der Verbrennung von Holzbrennstoffen im häuslichen Bereich mit einigen Nachteilen zu rechnen. Das gilt vor allem für die Verwendung von Brennstoffen mit hohem Aschegehalt wie zum Beispiel Stroh [26]; aber auch bei naturbelassenen Holzbrennstoffen kann es zu kritischen Emissionen kommen, insbesondere wenn der Aschegehalt des Brennstoffs beispielsweise aufgrund eines hohen Rindenanteils relativ hoch ist. Ascheärmerer Brennstoff wird dagegen verwendet, wenn es sich um Holzpellets nach Önorm M7135 [32] oder DIN 51 731 [8] handelt, da dieser Brennstoff in der Regel aus ent-rindeten Holzrückständen hergestellt wird.

Neben dem eigentlichen Gesamtstaubausstoß ist aber auch die Qualität der emittierten Partikel von besonderer Bedeutung. Dabei kann es sich nicht nur um Feststoffteilchen sondern auch um flüssige Stoffe handeln, die z. B. aus der Kondensation langkettiger Kohlenwasserstoffe (Teere) während der Verbrennung stammen. Man bezeichnet solchermaßen verunreinigte Gase auch als Aerosole, d. h. es handelt sich um mit festen oder flüssigen Stoffen angereicherte Gase, welche die Stoffteilchen über längere Zeit in der Schwebelage halten können. Die Gesamtmasse von Aerosol-Partikeln wird auch als partikuläre Materie (Particulate matter, PM) bezeichnet.

In der Umgebungsluft befinden sich Partikel von etwa $0,01 \mu\text{m}$ bis über $50 \mu\text{m}$ Durchmesser [5]. Als "Feinstaub" werden die Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser (d_{ae}) von weniger als $10 \mu\text{m}$ bezeichnet; unterhalb von $1 \mu\text{m}$ beginnt der sogenannte Submikronbereich der Partikelgrößen. Für Mensch und Tier sind vor allem die lungengängigen Partikel von Bedeutung; sie werden mit der Atemluft eingeatmet und dringen je nach ihrer Größe und je nach Art der Atmung unterschiedlich weit ein. Während Teilchen mit einem aerodynamischen Durchmesser von mehr als $10 \mu\text{m}$ in der Nase und im Rachenraum fast vollständig zurückgehalten werden, gelangen Teilchen kleiner als etwa $1 \mu\text{m}$ zu einem Großteil in den Bereich der Alveolen und können im Lungengewebe eingelagert werden. Aufgrund des hohen Abscheidegrads von submikronen Partikeln im Lungentrakt werden Partikel $< 1 \mu\text{m}$ auch als lungengängig bezeichnet [37].

Lungengängige feste oder flüssige Partikel aus Verbrennungsprozessen gelten als besonders schädlich, da sie auf der Oberfläche adsorbierte unverbrannte Kohlenwasserstoffe oder Schwermetalle mit sich führen können. Feine Ruß- und Aschepartikel erfüllen somit eine Transportfunktion für Schadstoffe und können daher teilweise reizend, toxisch und mutagen wirken [23][36]. Von besonderer Bedeutung sind dabei einige polyaromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), die ein kanzerogenes Potential aufweisen wie z. B. Benzo(a)Pyren (BaP).

Derartige gesundheitsgefährdende submikrone Partikel der Luft stammen zu einem großen Teil aus Verbrennungsprozessen, daher kommt dieser Emissionsquelle bei der Reinhaltung der Luft besondere Beachtung zu. Für biogene Brennstoffe in Kleinanlagen gilt das aufgrund des kaum vermeidbaren Staubausstößes umso mehr.

Aus diesem Grund wurden bereits in der Vergangenheit einige Untersuchungen zur Problematik der Feinstäube aus Biomassefeuerungen durchgeführt. Sie zeigen, dass für die Partikel, die bei den üblichen Verbrennungsbedingungen und Einsatzbrennstoffen aus automatisch beschickten Holzfeuerungen freigesetzt werden, meist eine unimodale Korngrößenverteilung vorliegt, deren

Maximum zwischen 0,05 und 0,2 mm liegt (verschiedene Quellen, zitiert bei Nussbaumer [29]). Beispielsweise resultiert die bei der Verbrennung von naturbelassenem Holz, Spanplatten, Altholz und Gras in einer 450 kW Vorschubrostfeuerung freigesetzte Partikelmasse zu mehr als 80 % aus Partikeln mit einem Durchmesser von unter 1 mm [20] [21]. Die submikronen Partikelkonzentrationen variieren dabei von 70 mg/Nm³ bei 11 Vol.-% O₂ (naturbelassenes Holz) bis 580 mg/Nm³ (Gras). Eine Ausnahme bilden Brennstoffe mit erhöhtem Rindenanteil, bei deren Verbrennung in einer Vorschubrostfeuerung nur mit rund 50 % bzw. 30 mg/Nm³ Flugstaubpartikel im Submikronbereich zu rechnen ist und deren Partikel bimodal mit Maxima bei ca. 0,1 und 6 mm verteilt sind [21] [22].

Auch bei der Brennstoffnutzung in kleineren häuslichen Zentralheizungskesseln sind erhebliche brennstoffbedingte Unterschiede zu erwarten. Untersuchungen der Landtechnik Weihenstephan an einer automatisch beschickten Biomassefeuerung (50 kW Nennwärmeleistung) zeigen, dass bei sämtlichen Halmgutbrennstoffen und beim Rapspresskuchen ein deutlich höherer Feinstaubanteil festzustellen ist als beim Fichtenhackgut [26]. Beim Halmgut und beim Rapspresskuchen entfallen demnach rund 80 % der gemessenen Flugstaubpartikel auf den aerodynamischen Durchmesserbereich bis 0,45 µm (Weizenstroh) bzw. bis 1,8 µm (Triticale-Ganzpflanze). Damit liegt auch bei Kleinfeuerungen der größte Teil der Gesamtstaubemission bei diesen Brennstoffen im Submikronbereich (d_{ae} < 1 µm) vor.

Allerdings trifft das nicht für Fichtenholz zu, wo der Flugstaubanteil im Submikronbereich mit rund 35 % deutlich geringer war. Diese Brennstoffunterschiede zwischen Halmgut und Holz treten noch deutlicher zu Tage, wenn anstelle der Massenanteile (relative Werte) die Massenkonzentrationen (tatsächlich emittierte Massen) verglichen werden. Beispielsweise für den Brennstoff "Weizenstrophpellets" lag die mittlere Emission der Submikronpartikel mit 119 mg/Nm³ (bei 13 % O₂) um rund das 8-fache höher als beim Fichtenholz; dagegen waren die relativen Massenanteile nur um das 2,4-fache höher [26].

Für die submikronen Partikel, die den Hauptanteil der Feststoffemissionen ausmachen, besitzen konventionelle Zyklone nahezu keine Abscheidewirkung. Eine effiziente Abscheidung ist lediglich durch filternde Abscheider (z. B. Gewebefilter, Elektrofilter) möglich. Derartige Maßnahmen sind aber für die meisten Kleinanlagen wirtschaftlich untragbar. Das gilt insbesondere für die Scheitholzkessel, die in der Regel gegenüber Hackschnitzelfeuerungen meist geringere Nennwärmeleistungen aufweisen, aber auch für Pelletheizkessel, bei denen handelsübliche Anlagen schon im Leistungsbereich ab ca. 8 kW angeboten werden. Insbesondere für die beiden letztgenannten Feuerungsarten liegen bislang kaum belastbare Messungen über die Partikelgrößenverteilung der emittierten Stäube vor.

2 Zielsetzung

Auf Basis der in Kapitel 1 vorgestellten Problematik und aufgrund der teilweise lückenhaften Kenntnisse bei bestimmten Feuerungsarten sollen in der vorliegenden Untersuchungen repräsentative Messungen über die Emissionen unterschiedlicher Staubpartikelgrößen aus häuslichen Holz-Zentralheizungsanlagen (Wärmeleistung < 50 kW) durchgeführt werden. Dadurch sollte der Kenntnisstand über Staubemissionen in diesem Bereich verbessert werden und die Einschätzungen über das Risikopotential der Holzverbrennung auf eine verbreiterte Datenbasis gestellt werden. Neben den Erkenntnissen über den Gesamtstaubausstoß sowie dessen Korngrößenverteilung sollten zusätzliche Messdaten bezüglich der übrigen umweltrelevanten Schadstoffkomponenten (Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffe, Stickstoffoxide) sowie über den Wirkungsgrad gewonnen werden, um so eine Gesamtbeurteilung zu ermöglichen und gegebenenfalls Wechselwirkungen zu erkennen. Um das Ziel einer möglichst umfassenden Darstellung der in der Praxis möglichen Partikelemissionen zu erreichen, mussten verschiedene Aspekte und Einflussgrößen berücksichtigt werden, durch die Bandbreite der Betriebszustände und Einsatzbedingungen abgedeckt werden konnte. Diese Aspekte werden nachfolgend dargestellt.

Unterschiedliche Feuerungsarten

Um das vorliegende Spektrum von Feuerungsarten ausreichend genau bewerten zu können, waren für die Messungen sowohl automatisch als auch handbeschickte Feuerungen auszuwählen. Bei den automatischen Feuerungen sind sowohl Hackschnitzelfeuerungen als auch Pelletfeuerungen von Bedeutung, so dass beide Prinzipien in der Untersuchung berücksichtigt werden mussten. Gleichzeitig unterschieden sich die darin eingesetzten Brennstoffe (Hackschnitzel, Pellets), wodurch eine weitere Variabilität untersucht wurde.

Stand der Technik

Damit auch der Altbestand von Anlagen aus den Anfängen der technologischen Entwicklung in der Feuerungstechnik zumindest ansatzweise bewertet werden kann, wurden sowohl eine moderne Anlage als auch eine Altanlage (beides Scheitholzkessel) in die Untersuchung mit einbezogen.

Laststufe

Da die momentane Heizlast der Anlage einen Wirkung auf den Schadstoffausstoß haben kann, musste auch dieser Einfluss in zwei bis drei Stufen berücksichtigt werden. Dadurch sollten die wichtigsten Betriebszustände, die in der Praxis der Holzverbrennung auftreten können, erfasst werden.

Wassergehalt

Auch der Wassergehalt kann sich auf das Niveau des Schadstoffausstoßes auswirken. Bei Pelletfeuerungen ist dieser Parameter jedoch unbedeutend (Maximalwert nach DIN 51 731: 12 % Wassergehalt [8]) und konnte vernachlässigt werden. Bei Scheitholzfeuerungen sind zwar Wassergehaltseinflüsse auf das Emissionsverhalten bekannt, jedoch werden aufgrund der leicht zu erreichenden Nachtrocknung im Lagerstapel in der Regel nur trockene Brennstoffe eingesetzt, zumal auch technische Gründe gegen eine Verbrennung von feuchtem Scheitholz sprechen. Auch hier konnte daher auf eine Betrachtung dieses Einflusses verzichtet werden. Größere Variabilität beim

Wassergehalt liegt in der Praxis dagegen bei den Hackschnitzelbrennstoffen vor, daher musste dieser Brennstoffparameter in der Untersuchung abgestuft werden.

3 Methodisches Vorgehen

Bei Emissionsmessungen an Holzfeuerungen treten stets eine Vielzahl von Einfluss- und Störgrößen auf, die – anders als bei den homogenen und leicht dosierbaren Brennstoffen wie Heizöl oder Erdgas – die Aussagekraft und die Verallgemeinerungsfähigkeit der Ergebnisse beeinträchtigen. Zu diesen Störgrößen zählen die Brennstoffzusammensetzung und -eigenschaften ebenso wie die dynamischen und ständig mehr oder weniger stark wechselnden Betriebszustände in der Feuerung, durch die sich auch die Strömungsverhältnisse in den Mess- und Probenahmestrecken laufend ändern. Messungen an Holzfeuerungen sind daher stets mit einem relativ hohen Maß an Unsicherheit hinsichtlich der Genauigkeit verbunden, mit der die jeweilige Feuerungsart repräsentativ und für das gesamte mögliche Einsatzspektrum abgebildet werden kann. Die versuchs-technischen und methodischen Maßnahmen stellen daher notwendigerweise einen Kompromiss zwischen messtechnisch wünschenswertem und wirtschaftlich vertretbarem Aufwand dar. Das gilt nicht nur für die Auswahl der Praxisfeuerungen, ihre Betriebszustände und die verwendeten Brennstoffe, sondern auch für die Anzahl an Wiederholungen sowie für Fragen der Versuchsdurchführung und der mess- und aufbautechnischen Ausstattung. Nachfolgend werden der Versuchsplan und die messtechnische Vorgehensweise dargestellt, dabei wurde versucht, die o. g. Unsicherheiten so weit wie möglich zu minimieren.

3.1 Versuchsprogramm (Übersicht)

Um die in Kapitel 2 definierten Ziele zu erreichen, wurde ein Versuchsprogramm erarbeitet, welches den Einflussgrößen und der technologischen Vielfalt von Anlagen möglichst umfassend Rechnung trägt. Hierfür wurden zum einen praxistypische Kleinanlagen (Stückholz-, Hackgut-, Pelletkessel) ausgewählt und zum anderen wurde die Wirkung möglicher Einflussgrößen (Anlagenart, Aufbereitungsform des Brennstoffs, Wassergehalt und der Heizlast) berücksichtigt. Der dazu aufgestellte Versuchsplan ist in dargestellt. In der Untersuchung wurden gemäß Tabelle 1 für insgesamt 13 verschiedene Varianten jeweils zwei Messungen, d. h. insgesamt 26 Versuche durchgeführt. Bei den ausgewählten Feuerungen handelte es sich um die in Kapitel 3.2 (Tabelle 2) zusammengestellten und beschriebenen Anlagen.

Im Verlauf der Projektdurchführung wurde die angestrebte Anzahl von 26 Versuchen (Tabelle 1) deutlich überschritten, da sich bei den Messungen herausstellte, dass zur Absicherung der Datenbasis weitere Wiederholungen erforderlich waren oder zusätzliche Einstellungen und Teilaspekte betrachtet werden mussten. Beispielsweise wurde ein zusätzlicher Schwachlastversuch mit Buchenholz durchgeführt, weil sich herausstellte, dass das ansonsten verwendete Fichtenscheitholz zu erheblicher Brückenbildung im Glutbereich neigte, wodurch die Messergebnisse kaum für die gesamte Bandbreite der möglichen Holzarten repräsentativ sein konnten. Insgesamt wurden somit 35 Partikelmessungen durchgeführt.

Tabelle 1: Versuchsplan

Feuerungstyp	Brennstoff	Anzahl auswertbarer Partikelmessungen			Summe Versuche
		NWL ¹⁾	MWL ¹⁾	KWL ¹⁾	
Stückholzkessel, "modern"	Scheite	2	--	2	4
Stückholzkessel ¹⁾ , "alte Technik"	Scheite	2	--	2	4
Hackgutfeuerung, (Neuanlage)	Hackgut, w= 15 %	2	2	2	6
	Hackgut w = 35 %	2	2	2	6
Pelletkessel, (Neuanlage)	Holzpellets	2	2	2	6
Summe:		10	6	10	26

¹⁾ NWL Nennwärmeleistung, MWL mittlere Wärmeleistung, KWL kleinste Wärmeleistung

Versuchsvarianten. Für jeden Kessel wurden Verbrennungsversuche mit trockenem Brennstoff bei Nennwärmeleistung und einer für die Versuche festgelegten kleinsten Wärmeleistung durchgeführt. Letztere lag bei den automatisch beschickten Feuerungen bei ca. 30 % und bei der "modernen" und "alten" Scheitholzkesseltechnik bei ca. 50 bzw. 70 % der Nennwärmeleistung (vgl. Tabelle 9, S. 36). Die Hackgut- und die Pelletfeuerung wurden außerdem bei einer mittleren Wärmeleistung (ca. 60 bis 65 % der Nennwärmeleistung) eingesetzt (vgl. Tabelle 9, S. 36). Bei der Hackgutfeuerung wurden neben dem lufttrockenem Holz auch mittelfeuchter Brennstoff mit einem angestrebten Wassergehalt von ca. 35 % eingesetzt. Dieser Feuchtebereich entspricht der praxisüblichen Variabilität bei kleineren Hackschnitzelfeuerungen. Zum Einsatz kamen Fichtenholz (durchgehend) und in einem zusätzliche Fall auch Buchenholz, das je nach Bedarf auf eine Scheitlänge von 50 cm gesägt und gespalten bzw. zu Hackschnitzeln gehackt wurde. Die Holzpellets wurden von einem Großhändler bezogen und entsprachen laut Hersteller den Anforderungen der DIN 51 731 [8].

Mess- und Analyseprogramm. Zu jeder Versuchseinstellung wurden je zwei Impaktorprobenahmen über eine Dauer von 1 bis 4 Stunden durchgeführt. Über die jeweilige Probenahmedauer wurden zeitgleich die Emissionen an CO, Gesamtstaub, VOC und NO_x ermittelt, sowie auch die Betriebsparameter der Feuerungsanlage und der Wirkungsgrad (feuerungstechnisch und Kesselwirkungsgrad) registriert. Aufgrund von Störungen während des Versuchsablaufs war bei einzelnen Varianten nur eine Einzelmessung am jeweiligen Versuchstag durchführbar, wodurch eine weitere Messung auf einen neuen Versuchstag verlegt werden musste.

3.2 Beschreibung der Feuerungsanlagen

Bei den ausgewählten Feuerungen handelte es sich um die in Tabelle 2 dargestellten Anlagen. Eine ausführlichere Beschreibung dieser Anlagen geben die nachfolgenden Kapitel 3.2.1 bis 3.2.4.

Tabelle 2: Für die Messungen ausgewählte Feuerungsanlagen

Bezeichnung	Hersteller, Typ	Nennwärmeleistung, NWL ¹⁾ (kW)
Stückholzkessel "modern"	Fröling, FHG Turbo 3000	30
Stückholzkessel "alte Technik"	HDG Bavaria, Typ SL 33 (heute nur noch als Wärmetauscher verwendet)	33
Hackgutkessel	Heizomat, HSK-RA-50	50
Pelletkessel	Fischer Guntamatic, BIOSTAR 15	15

¹⁾ Laut Herstellerangabe

3.2.1 Stückholzkessel "modern"

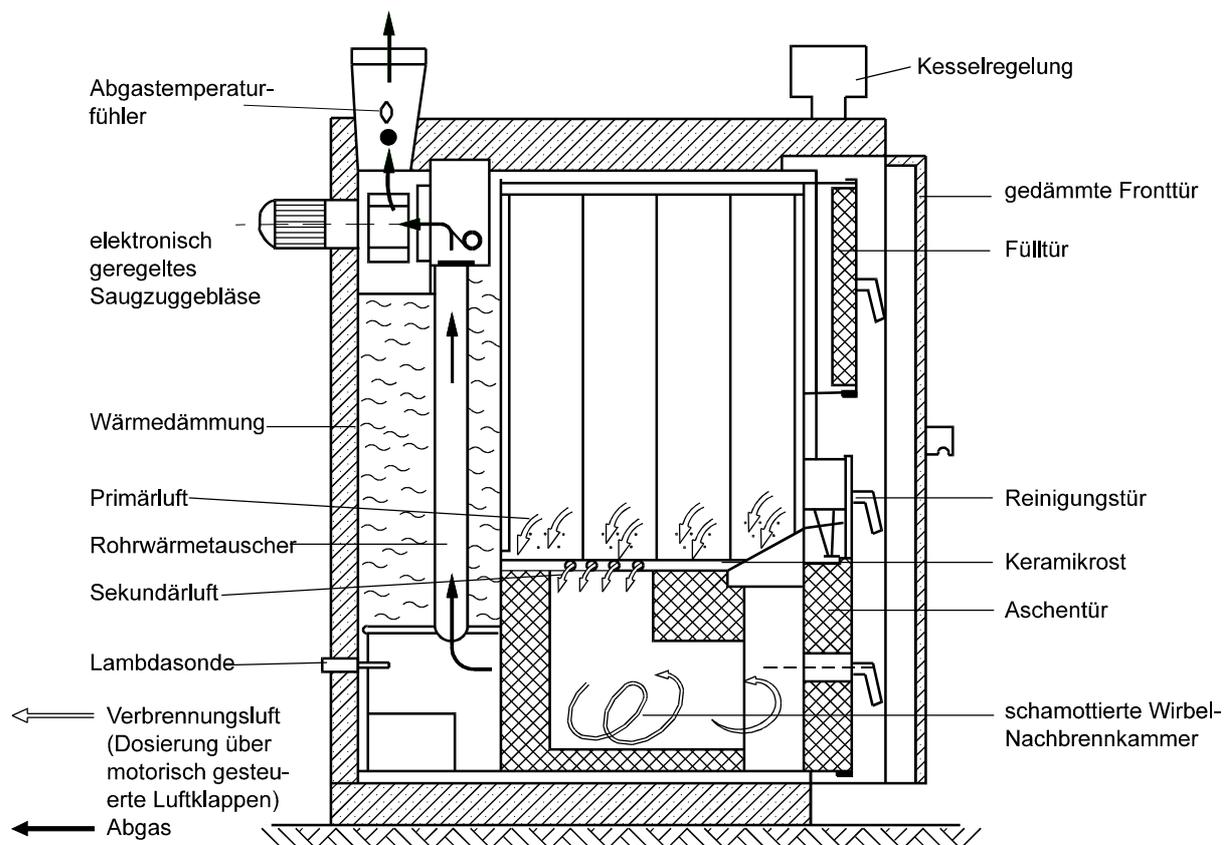


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Stückholzkessels FHG Turbo 3000 (Fröling)

Als Stückholzkessel wurde eine Feuerung vom Typ FHG Turbo 3000 von der Firma Fröling zur Verfügung gestellt (Abbildung 1). Sie wurde fabrikneu angeliefert. Um einen praxisnahen Anlagenzustand herbeizuführen, wurde die Anlage vor Messbeginn in einem einwöchigen Betrieb "eingefahren".

Die Anlage weist ein Wärmeleistungsspektrum von 9 bis 30 kW auf und ist für den Einsatz von Grobhackgut und Stückholz mit einer Länge bis 50 cm zugelassen.

Zur Gewährleistung einer hohen Ausbrandqualität und eines hohen Wirkungsgrades ist die Feuerungsanlage mit einer elektronischen Regelung ausgerüstet. Die Verbrennungsluftzufuhr wird in Abhängigkeit von der Luftüberschusszahl (λ) sowie der Abgas- und Kesselwassertemperatur geregelt.

Weitere technische Merkmale der Anlage sind in Tabelle 3 zusammengestellt.

Tabelle 3: Anlagentechnische Merkmale des Stückholzkessels FHG Turbo 3000

Anlagenkomponente	Ausführung
<i>Feuerung</i>	
Anlagenart	Stückholzfeuerung
Bauart	im Kessel integrierte Feuerung
Feuerungsprinzip	unterer Abbrand (Sturzbrand)
Brennstoffzufuhr	manuell
Entaschung	von Hand
Zündung	von Hand
<i>Wärmetauscher</i>	
Form	Wärmetauscher, stehend, mit Schikanen
Reinigung	manuell
<i>Verbrennungsluft</i>	
Primärluftzufuhr	Beidseitig über den Feuerraumboden
Sekundärluftzufuhr	beidseitig in die Brennkammerdüse
Gebläse	Saugzuggebläse
Luftmengenanpassung	Gebläsedrehzahl, Luftklappen
<i>Leistungsregelung</i>	
Regelgrößen	Kesselwassertemperatur, Abgastemperatur
Stellgrößen	Gebläsedrehzahl, Primärluftmenge
<i>Verbrennungsregelung</i>	
Regelgrößen	Abgastemperatur, Lambda
Stellgrößen	Gebläsedrehzahl, Sekundärluftmenge

3.2.2 Stückholzkessel "alte Technik"

Der Stückholzkessel mit "alter Verbrennungstechnik" wurde als Wärmetauschkessel von der Firma HDG Bavaria zur Verfügung gestellt. Er wurde fabrikneu angeliefert. Um einen praxisnahen Anlagenzustand herbeizuführen, wurde die Anlage vor Messbeginn in einem ca. einwöchigen Betrieb "eingefahren".

Bei dieser Anlage (Abbildung 2) handelt es sich um eine Bauform, die ursprünglich als Scheitholzkessel verwendet wurde; heute jedoch lediglich als Wärmetauschkessel z. B. in Verbindung mit einem Hackschnitzel-Vorofen eingesetzt wird. Aus heutiger Sicht stellt die Anlage daher keine eigene Feuerung sondern vielmehr eine Systemkomponente einer automatisch beschickten Hackgutfeuerungsanlage dar. Folgerichtig ist die Verbrennung von Scheitholz als eine Not-Betriebsart anzusehen. Da derartige Kessel aber in der Vergangenheit auch als eigenständige Feuerungen konzipiert und eingesetzt worden waren, konnte durch eine entsprechende Verwendung als Scheitholzkessel im vorliegenden Messprogramm auf die Betriebs- und Emissionsbedingungen "älterer Techniken" und somit auf den Altanlagenbestand mit niedriger technologischer Reife geschlossen werden.

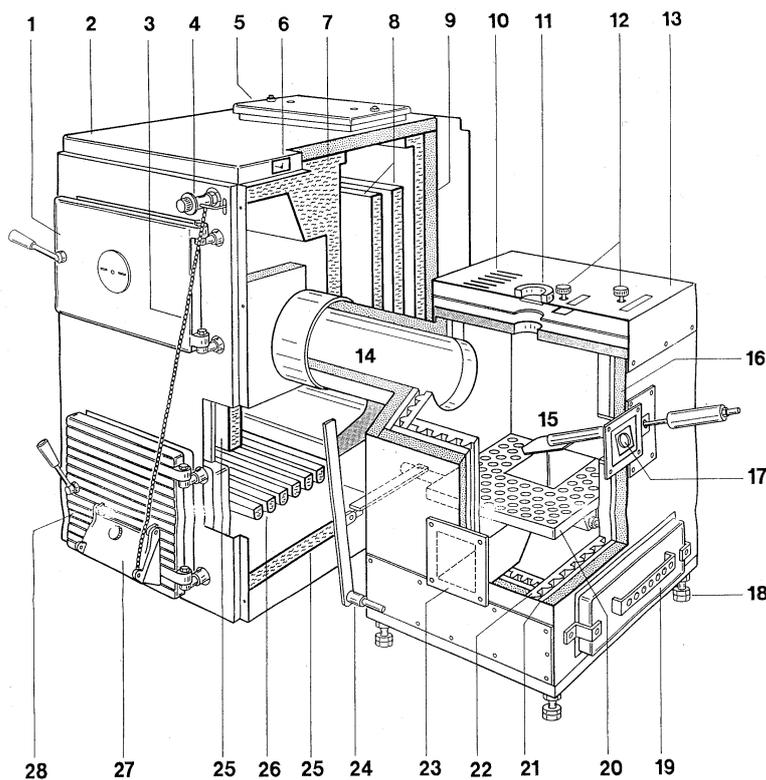


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Wärmetauschkessels SL 33; hier mit Vorofen

Als Festbrennstoffkessel hat die Feuerung vom Typ SL 33 eine Nennwärmeleistung von 33 kW. Die Verbrennungsluftzufuhr erfolgt durch den natürlichen Kaminzug (Naturzug) über eine frontseitige Luftklappe, dabei ist keine Aufteilung in Sekundär- oder Primärluft möglich. Über eine

thermostatisch betätigte Luftklappe wird – in Abhängigkeit von der Kesselwassertemperatur – lediglich die zugeführte Gesamtluftmenge eingestellt bzw. gedrosselt. Im Unterschied zu modernen Scheitholzkesseln verfügt diese Feuerung auch nicht über eine räumliche Trennung von Entgasungszone und heißer Nachverbrennung. Da die Wärmetauscherflächen somit teilweise auch die unmittelbare Abgrenzung des Feuerraums bilden, werden die Flammen und Brenngase bereits während der Verbrennung abgekühlt, wodurch sich die Emission unverbrannter Abgasbestandteile erhöht.

Weitere technische Merkmale der Anlage sind in Tabelle 4 zusammengestellt.

Tabelle 4: Anlagentechnische Merkmale des Wärmetauscherkessels SL 33 (HDG)

Anlagenkomponente	Ausführung
<i>Feuerung</i>	
Anlagenart	Stückholzfeuerung
Bauart	
Feuerungsprinzip	im Kessel integrierte Feuerung
Brennstoffzufuhr	unterer seitlicher Abbrand (wassergekühlter Rost)
Entaschung	manuell
Zündung	von Hand
	von Hand
<i>Wärmetauscher</i>	
Form	Plattenwärmetauscher, stehend
Reinigung	manuell
<i>Verbrennungsluft</i>	
Primärluftzufuhr	von vorne durch den Rost
Sekundärluftzufuhr	keine
Gebälse	Naturzug
Luftmengenanpassung	thermostatischer Feuerungsregler (Luftklappe)
<i>Leistungsregelung</i>	
Regelgrößen	Kesselwassertemperatur
Stellgrößen	Verbrennungsluftmenge
<i>Verbrennungsregelung</i>	
Regelgrößen	Keine
Stellgrößen	keine

3.2.3 Hackgutkessel

Als Hackgutkessel wurde eine Feuerung vom Typ HSK-RA 50 (Abbildung 3) von der Firma Heizomat zur Verfügung gestellt. Sie wurde zusammen mit einer Brennstoffzuführung fabriktreu angeliefert. Um ihr Betriebsverhalten kennen zu lernen und um eine optimale Anlageneinstellung zu erreichen sowie einen praxisnahen Anlagenzustand herbeizuführen, wurde die Anlage vor Messbeginn in einem einwöchigen Betrieb "eingefahren".

Die Feuerungsanlage bietet ein Wärmeleistungsspektrum bis 50 kW und ist für den Einsatz von Holzspänen und Holzhackschnitzeln bis zu einer maximalen Größe von 50 mm geeignet. Durch eine automatische Rostreinigung sowie eine automatische Vorrichtung zur Entaschung und zur Abreinigung der Wärmetauscher wird ein ununterbrochener Betrieb bei gleichmäßig günstigen Betriebs- und Reinigungszuständen erreicht. Zur Gewährleistung einer hohen Ausbrandqualität und eines hohen Wirkungsgrades ist die Feuerungsanlage mit einer elektronischen Regelung ausgerüstet. Die Verbrennungsluftzufuhr und die Brennstoffmenge werden in Abhängigkeit von der Luftüberschusszahl (λ) sowie der Abgas- und Kesselwassertemperatur geregelt. Die Kesselleistung wird hierbei über diskrete, d. h. fest abgegrenzte Leistungsstufen geregelt; dabei wird in Abhängigkeit von der Kesselwassertemperatur zwischen Gluterhaltungs-, Teillast- und Nennlastbetrieb umschaltet.

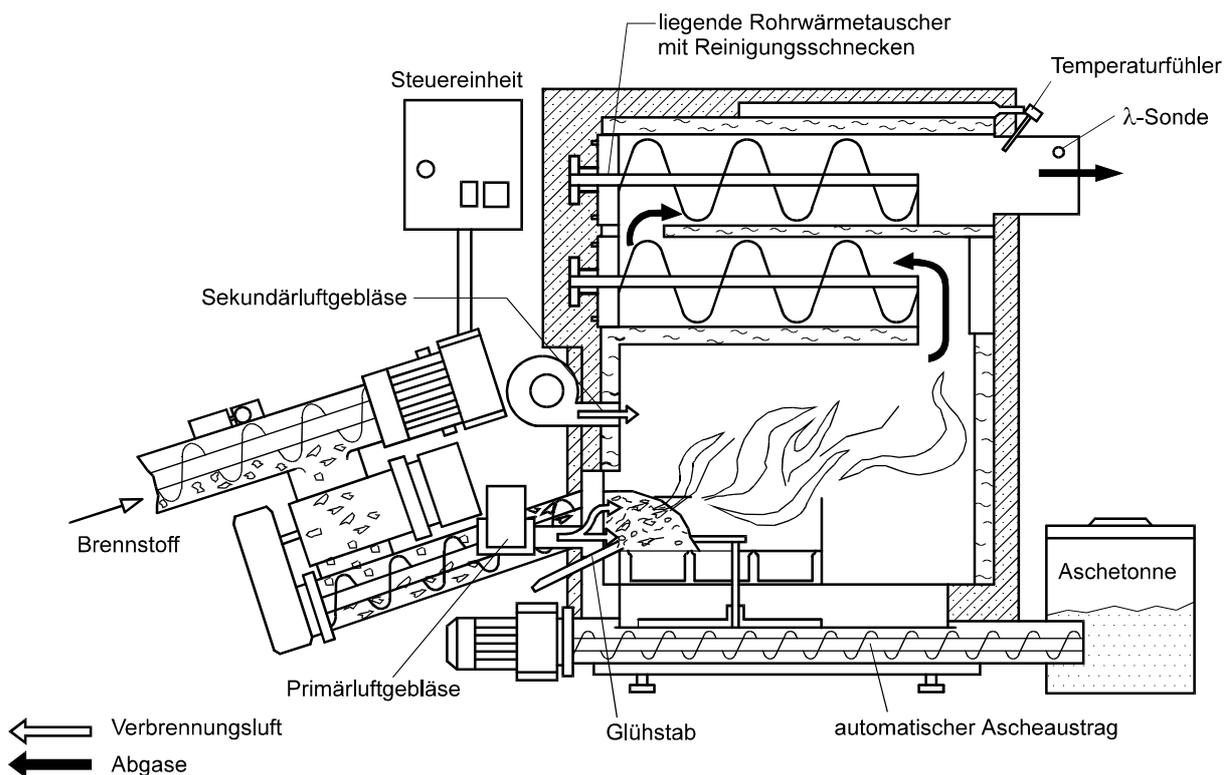


Abbildung 3: Schematische Darstellung d. Hackgutkessels HSK-RA-50 (Heizomat)

Brennstoffzuführung. Zur Brennstoffbevorratung und zur Erfassung des Brennstoffverbrauchs wurde eine separate Austrageinrichtung verwendet (Eigenbau Landtechnik Weihenstephan). Diese Vorrichtung besteht aus einem Tagesvorratsbehälter und einer stufenlos einstellbaren Austragschnecke, die von der Regelung der Feuerungsanlage angesteuert wurde. Zur Bestimmung des

Brennstoffverbrauchs über den jeweiligen Auswertzeitraum war die Zuführungseinrichtung an einer Wägezelle aufgehängt.

Weitere technische Merkmale der Anlage sind in Tabelle 5 zusammengestellt.

Tabelle 5: Anlagentechnische Merkmale d. Hackgutfeuerung HSK-RA 50 (Heizomat)

Anlagenkomponente	Ausführung
<i>Feuerung</i>	
Anlagenart	Hackgutfeuerung
Bauart	im Kessel integrierte Feuerung
Feuerungsprinzip	Einschub mit luftgekühltem Rost
Brennstoffzufuhr	automatisch
Entaschung	automatischer Ascheaustrag mit Schnecken ¹⁾
Zündung	automatisch mit Glühstab
<i>Wärmetauscher</i>	
Form	Rohrwärmetauscher, liegend
Reinigung	automatisch mit "Schnecken-turbulatoren" ¹⁾
<i>Verbrennungsluft</i>	
Primärluftzufuhr	beidseitig am Eintritt der Stokerschnecke über Düsenbohrungen
Sekundärluftzufuhr	beidseitig im oberen Bereich der Brennkammer
Gebläse	je ein Druckgebläse
Luftmengenanpassung	Primär- und Sekundärluftgebläsedrehzahl
<i>Leistungsregelung</i>	
Regelgrößen	Kesselwassertemperatur, Abgastemperatur
Stellgrößen	Brennstoff- und Primärluftmenge
<i>Verbrennungsregelung</i>	
Regelgrößen	Lambda und Abgastemperatur
Stellgrößen	Sekundärluftmenge

¹⁾ wurde während des Probenahmezeitraumes deaktiviert

3.2.4 Pelletkessel

Der Pelletkessel BIOSTAR 15 (Abbildung 4) wurde von der Firma Fischer Guntamatic zur Verfügung gestellt. Die Feuerungsanlage (Kessel und Brennstoffzuführung) war vor dem Anlieferungszeitpunkt bereits vom Hersteller in Betrieb genommen und getestet worden, so dass für die Messungen eine bereits "eingefahrene" Feuerung in praxisnahe Anlagenzustand verwendet werden konnte.

Die Feuerungsanlage vom Typ Biostar 15 hat einen Wärmeleistungsbereich von 3,5 bis 15 kW und ist für den Einsatz von Holzpellets nach ÖNORM M 7135 geeignet. Um sicherzustellen, dass größere Ascheablagerungen vom Rost vollständig entfernt werden, ist die Anlage mit einem automatischen Kipprost ausgestattet. Von Zeit zu Zeit wird der Kipp-Mechanismus selbsttätig aus-

gelöst, wodurch der als Lochplatte ausgeführte Rost herunterklappt und gegen eine vertikale Reinigungsplatte im Bereich des Rostaschesammlers prallt (Abbildung 4). Dadurch lassen sich auch eventuell anhaftende Ablagerungen, die zu Lochquerschnittsverengungen führen können, beseitigen. Die zusammen mit der Asche abgekippten noch brennbaren Bestandteile glühen im Aschebett aus während neu zugeführte Pellets auf dem gereinigten Rost gezündet werden.

Zur Gewährleistung einer hohen Ausbrandqualität und eines hohen Wirkungsgrades ist die Feuerungsanlage mit einer elektronischen Regelung ausgerüstet. Die Verbrennungsluftzufuhr und die Brennstoffmenge wird in Abhängigkeit von der Luftüberschusszahl (λ) sowie der Abgas- und Kesselwassertemperatur geregelt. Weitere technische Merkmale der Anlage sind in Tabelle 6 zusammengestellt.

Tabelle 6: Anlagentechnische Merkmale des Pelletkessels BIOSTAR 15

Anlagenkomponente	Ausführung
<i>Feuerung</i>	
Anlagenart	Pelletfeuerung
Bauart	im Kessel integrierte Feuerung
Feuerungsprinzip	Fallschacht mit automatischem Kipprost (Flachrost)
Brennstoffzufuhr	automatisch mit Förderschnecke
Entaschung	automatisch durch Kipprost ¹⁾
Zündung	automatisch mit Heißluftgebläse
<i>Wärmetauscher</i>	
Form	stehender Rohrwärmetauscher
Reinigung	von Hand mit Turbulatoren
<i>Verbrennungsluft</i>	
Primärluftzufuhr	durch Kipprost
Sekundärluftzufuhr	an Düse zwischen Primär- und Sekundärbrennraum
Gebälse	ein Saugzuggebläse
Luftmengenanpassung	Gebälседrehzahl
<i>Leistungsregelung</i>	
Regelgrößen	Kesselwassertemperatur
Stellgrößen	Brennstoffmenge, Verbrennungsluftmenge
<i>Verbrennungsregelung</i>	
Regelgrößen	Lambda und Abgastemperatur
Stellgrößen	Brennstoffmenge, Verbrennungsluftmenge

¹⁾ Die automatische Entaschung wurde während des Messzeitraumes deaktiviert

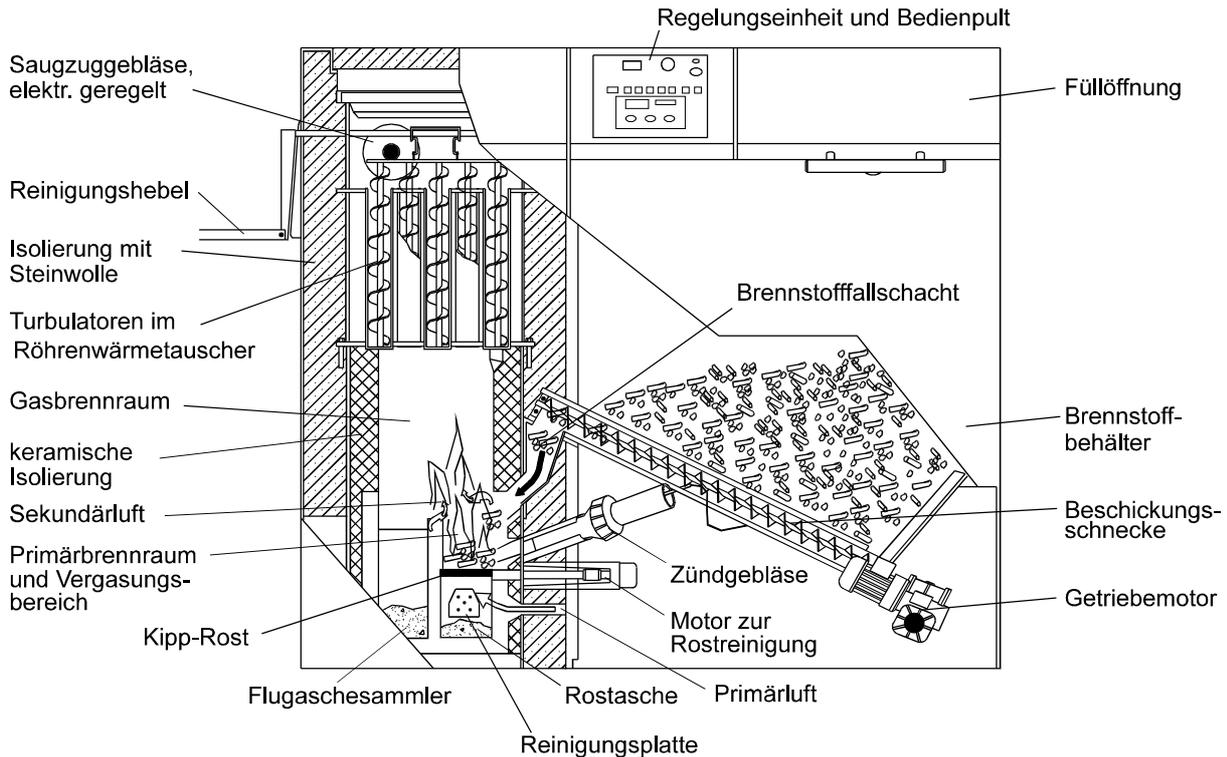


Abbildung 4: Schematische Darstellung des Pelletkessels BIOSTAR 15 (Fischer Guntamatic)

3.3 Versuchsbrennstoffe

Um den Einfluss unterschiedlicher Brennstoffeigenschaften bei den Verbrennungsversuchen so gering wie möglich zu halten, wurde für die Versuche mit Scheitholz und Hackschnitzeln ein einheitliches Ausgangsmaterial verwendet. Das Hackgut wurde daher aus dem gleichen Scheitholzbestand unmittelbar vor Versuchsbeginn mit einem mobilen Hacker hergestellt. Lediglich bei den Pellets konnte kein Einfluss auf die Rohstoffbasis genommen werden; sie wurden von der Firma Umdasch (Österreich) zur Verfügung gestellt und erfüllten die Anforderungen der DIN 51 731, Größenklasse HP 5 [8]. Einen Überblick über die verwendeten Brennstoffe gibt die Tabelle 7. Die verwendeten Prüfmethode sind in Kapitel 3.5.2 dargestellt.

Tabelle 7: Brennstoffparameter zum Zeitpunkt der Feuerungsversuche

Brennstoff	Aufbereitung	Wassergehalt
		%
Fichte	Scheitholz ¹⁾	15
Buche	Scheitholz ¹⁾	15
Fichte 1	gehackt	14
Fichte 2	gehackt	36
Holz	pelletiert	8

¹⁾ Länge 50 cm, Umfang 25-30 cm

3.4 Versuchsaufbau und Messanordnung

Die Messungen wurden überwiegend auf dem Feuerungsprüfstand der Bayerischen Landesanstalt für Landtechnik durchgeführt. Eine Ausnahme bilden die Versuche mit dem Scheitholzkessel "alte Technik", die auf dem Feuerungsprüfstand des Instituts für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD) der Universität Stuttgart durchgeführt wurden. Die messtechnische Ausstattung und die Versuchsbedingungen waren an beiden Standorten mit Ausnahme des Verdünnungstunnels (siehe unten) vergleichbar und wurden für diesen Messfall durch gemeinsame Planung und Abstimmung sowie durch gemeinsame Versuchsdurchführung am Standort Stuttgart sichergestellt. Den Versuchsaufbau und die Messstellenanordnung (am Standort in Weißenstephan) zeigt Abbildung 5.

Abgasmessstrecke. Die Staubpartikelverteilung und der Gesamtstaubgehalt mussten zeitgleich erfasst werden; hierzu bestand der Versuchsaufbau abgasseitig aus einer senkrechten Messstrecke mit einem Übergangsstück zum Anschluss an den Abgasstutzen der Feuerungsanlage. Die Messstellen für den Impaktor und das Filterkopfgerät wurden übereinander in ausreichendem Abstand von ca. $4 \times D$ angeordnet (in Anlehnung an VDI 2066 Blatt 1 [8]). Um zusätzliche Störeinflüsse zu vermeiden, wurde die Geschwindigkeitsmessstelle und die Gasprobenahmesonde am Ende der Messstrecke platziert. Im vertikalen Rohr waren die "DIN-Messstellen" für Abgastemperatur und Kaminzug untergebracht. Sie sind in ihrer Lage und Position nach DIN 4702 Teil 2 [7] (Regeln für die heiztechnische Prüfung) angeordnet. Aufgrund der geringen Deckenhöhe des Prüfraumes und zur Anhebung der Gasgeschwindigkeit wurde die vertikale Messstrecke im Rohrquerschnitt auf einen Rohrinne Durchmesser von 100 mm reduziert. Dadurch konnte auch bei geringen Abgasmassenströmen die Ermittlung der Gasgeschwindigkeit mit einfacher Differenzdruckmessung erfolgen. Außerdem ermöglichte diese Maßnahme die isokinetische Probenahme, da die vorhandenen Düsensätze erst für höhere Abgasgeschwindigkeiten geeignet waren. Nach Durchtritt durch die Messstrecke wurde das Abgas über eine flexible Verbindungsleitung in einen Edelstahlkamin geleitet und über diesen an die Umgebung abgeführt.

Verdünnungstunnel. Die Probenahmen am Scheitholzkessel "alte Technik" mussten auf dem Prüfstand des Instituts für Verfahrenstechnik (IVD) mit Hilfe eines Verdünnungstunnels durchgeführt werden, da derartige Altkessel erfahrungsgemäß einen überdurchschnittlich hohen Anteil an kondensierbaren Anteilen im Abgas aufweisen. Der genaue Aufbau dieser Versuchsanlage ist im Teilbericht des IVD zu diesem Projekt beschrieben.

Wärmeleistungsmessstrecke. Die Feuerungsanlagen wurden wasserseitig an einen speziellen Kühlkreislauf angeschlossen. Dieser ermöglichte die direkte Erfassung der vom Kessel abgegebenen Nutzwärme. Die hydraulische Messstrecke entspricht den Anforderungen der DIN 4702 Teil 2 [7] (vgl. „Kreislauf mit Kurzschlussstrecke“). Sie wird ebenso wie der gesamte Kühlkreislauf bei LAUNHARDT et al. [26] ausführlich beschrieben.

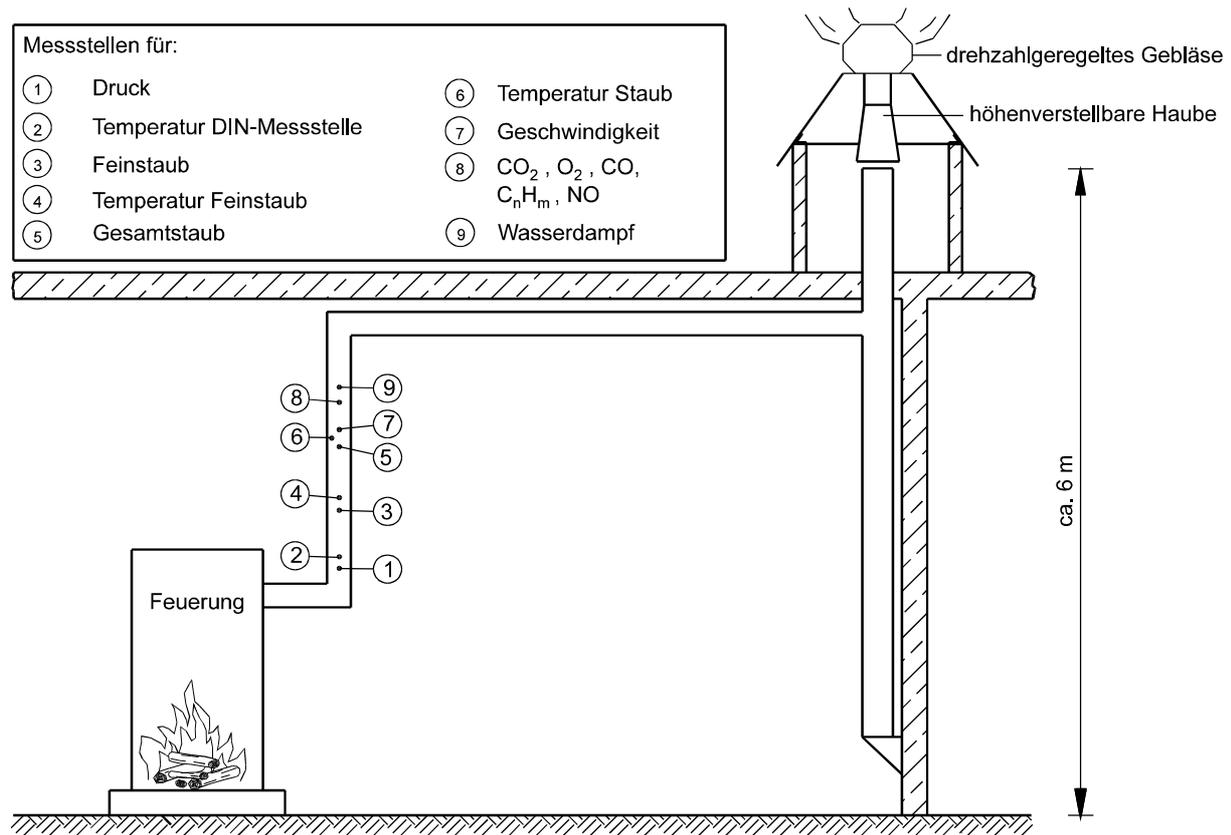


Abbildung 5: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus und der Messstellenanordnung mit Abgasführung

3.5 Mess- und Analyseverfahren

3.5.1 Feuerungs- und Emissionsmessgrößen

Im Rahmen des Messprogramms wurden folgende Feuerungs- und Emissionsmessgrößen erfasst:

Luftverunreinigende Stoffe im Abgas:

- Kohlenstoffmonoxid (CO)
- Organische Stoffe (Volatile Organic Carbon, VOC)
- Stickstoffoxide (NO_x)
- Gesamtstaub
- Feinstaub (Partikelgröße und -verteilung des Staubes)

Betriebsparameter der Feuerungsanlage:

- Kohlenstoffdioxidgehalt im Abgas (CO₂)
- Wärmeleistung und Kesselwirkungsgrad und feuerungstechnischer Wirkungsgrad
- Abgastemperaturen

Zusätzlich wurden weitere Messgrößen wie Wasserdampfgehalt und Sauerstoffgehalt zur Umrechnung von Messgrößen erfasst. Die Anordnung der jeweiligen Messgeräte im Abgasstrom zeigt Abbildung 6. Einige Messgrößen wurden kontinuierlich erfasst, andere nur diskontinuierlich.

Kontinuierlich erfasste Messgrößen. Die im Versuchsstand kontinuierlich gemessenen Parameter und die hierfür eingesetzte Messgerätetechnik werden in Tabelle 8 zusammengestellt. Die angewandten Messmethoden entsprechen standardisierten Verfahren und sind in den zugehörigen DIN-Normen und VDI-Richtlinien dokumentiert.

Alle Messdaten wurden als Analogsignale von zwei Dataloggern (FLUKE HYDRA 2620A) erfasst und von einem Personal Computer zur weiteren Verrechnung und Datenspeicherung über zwei serielle Schnittstellen (RS 232) aufgenommen. Als Messdatenerfassungssoftware wurde das an der Bayerischen Landesanstalt für Landtechnik entwickelte Programm PSM 9.3 verwendet. Die Abtastdauer für 38 Dataloggerkanäle betrug ca. 9 s. Als Zeitintervall zur Mittelwertbildung wurden 60 s gewählt. Die Gasgeschwindigkeit wurde für jedes Intervall aus den Minutenmittelwerten der Messgrößen dynamischer Druck, Abgaszusammensetzung und Abgastemperatur berechnet.

Diskontinuierlich erfasste Messgrößen. Die Bestimmung der Staubemissionen als Gesamtstaub und Feinstaub (Partikelmasse, Partikelverteilung und -größe) erfolgte diskontinuierlich mittels anreichernder Abgasprobenahme und anschließender Laboranalyse. Die hierfür eingesetzten Messmethoden entsprechen standardisierten Verfahren, die in DIN-Normen und VDI-Richtlinien dokumentiert sind. Vom Projektpartner, dem Institut für Verfahrenstechnik der Universität Stuttgart, wurde für die Dauer der Versuchsreihen ein Kaskadenimpaktor Typ MARK 3 zur Verfügung gestellt.

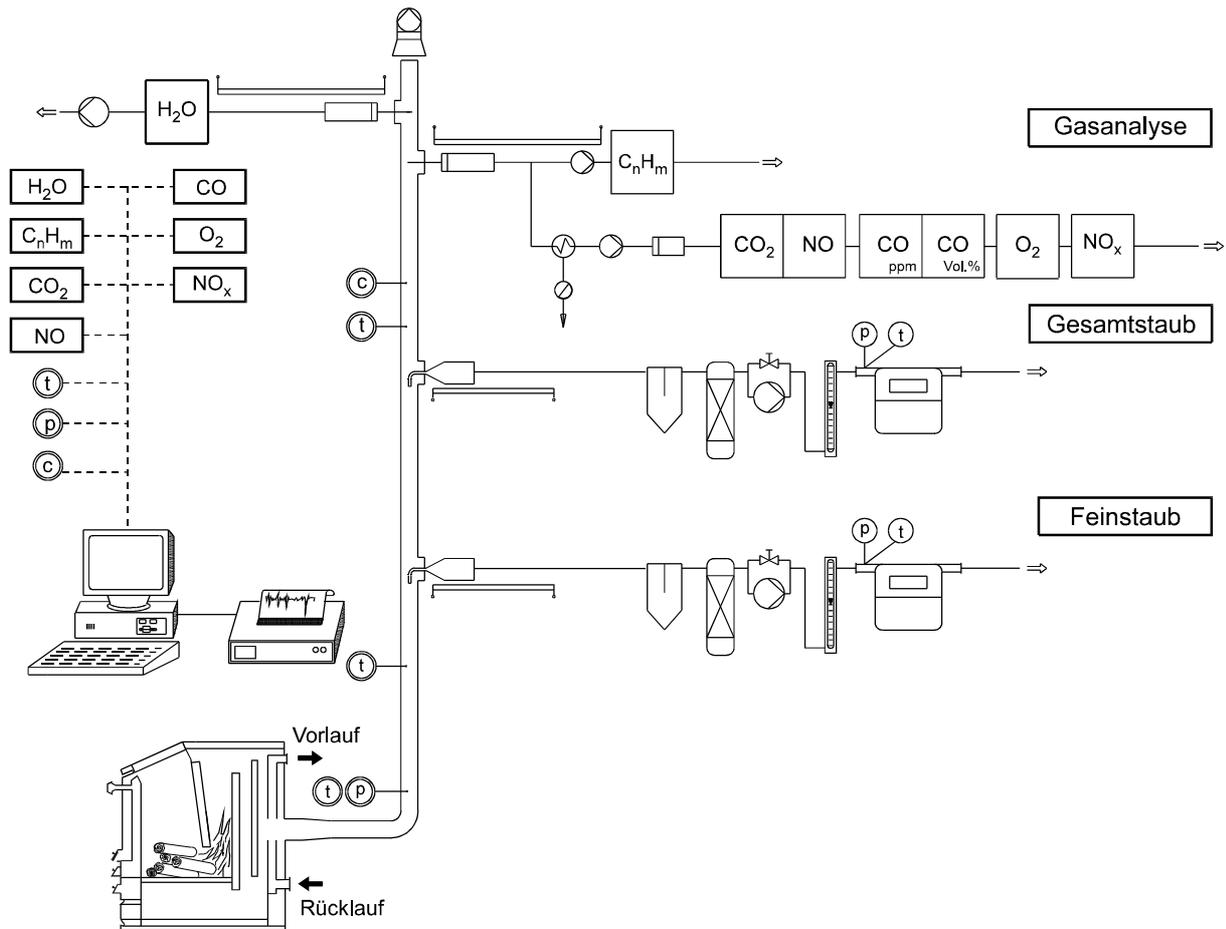


Abbildung 6: Schematische Darstellung des Messgerätaufbaus auf dem Prüfstand der Landtechnik Weihenstephan

Tabelle 8: Kontinuierlich erfasste Messgrößen – Technische Daten der Messgeräte

Messgröße	Messgerät/Hersteller	Messprinzip/-verfahren	aktiver Messbereich	Prüfgaskonzentration ¹⁾
Temperatur	Thermoelement (Typ K), Fa. Philips-Thermocoax	Thermoelektrizität	0-1000 °C	---
statischer Druck	Präzisions-Mikromanometer, Fa. Müller	Differenzdruck	0-200 Pa	---
dynamischer Druck	Staurohr mit Präzisions-Mikromanometer, Fa. Müller	Differenzdruck	0-200 Pa	---
Luftdruck ³⁾	Barograph, Fa. Lambrecht	Aneroiddose	900-1000 hPa	---
<i>Abgasbestandteile</i>				
O ₂	OXYNOS 100, Fa. Fisher-Rosemount	Paramagnetismus	0-21 %	20,9 % Luft-O ₂
CO ₂	BINOS 1004, Fa. Fisher-Rosemount	Infrarotabsorption	0-20 %	17 % in N ₂
H ₂ O	Hygrophil 4220 B, Fa. Ultrakust	Psychrometrie	10-500 g/kg	---
CO	BINOS 1001, Fa. Fisher-Rosemount	Infrarotabsorption	0-100 0-500 0-2500 0-5000 ppm ⁴⁾	450 bzw. 3950 ppm in N ₂
CO	BINOS 1001, Fa. Fisher-Rosemount	Infrarotabsorption	0-3 %	2,3 % in N ₂
VOC ⁶⁾	Modell VE 7, Fa. J.U.M.	Flammenionisation	0-10 0-100 0-1000 ppm ⁵⁾	90 ppm C ₃ H ₈ in N ₂
NO	BINOS 1004, Fa. Fisher-Rosemount	Infrarotabsorption	0-300 ppm	240 ppm NO in N ₂
NO _x ⁷⁾	Modell 951 A, Fa. Beckmann Industrial	Chemolumineszenz	0-250 ppm	240 ppm NO in N ₂
<i>Wärmeleistung und Wirkungsgrad</i>				
Temperatur ⁸⁾	Widerstandsthermometer (PT100), Fa. Heraeus	temperaturabhängige Widerstandsänderung	(-)50-150 °C	---
Kühlwasserstrom	Flügelradzähler mit Kontaktgeber, Fa. Spanner-Pollux	Flügelradrotation	0,12-2,5 m ³ /h	---
Brennstoffmenge	Brennstoffwaage, Fa. PESA	digitaler Zwei-Saiten- Massen-Maßgeber	0 - 60 kg	---
Brennstoffmassenstrom	Wägezelle mit Messverstärker, Fa. Hottinger Baldwin	Wägung	0-500 kg	---

Hinweise: Bestimmung von VOC und H₂O im feuchten Abgas bei vorgeschaltetem beheiztem Keramikfilter (Betriebstemperatur: 180 °C, Porengröße: ca. 0,9 µm) und beheizter Messgasleitung (Betriebstemperatur: 180 °C, Länge 5 m); Bestimmung von O₂, CO₂, CO, NO, NO_x im trockenen Abgas nach Messgaskühler (Gasausgangstaupunkt: 5 °C) und PartikelfeinfILTER (Porengröße: 0,9 µm und 0,2 µm)

1) relative Genauigkeit des Prüfgases: ± 2 % (lt. Herstellerangabe)
 3) Ablesung einmal am Tag
 4) automatische Messbereichumschaltung
 5) manuelle Messbereichumschaltung
 6) Summe der flüchtigen organischen Verbindungen; Messung im heißen Abgas (Θ = 180 °C) gemäß VDI-Richtlinie 3481 Blatt 1 [43], Ergebnisse bezogen auf trockenes Abgas
 7) NO_x = NO + NO₂
 8) Vor- und Rücklaufwassertemperatur, Kühlwassertemperatur, Raum- und Außentemperatur (je eine Messstelle)

Staub (Partikelmasse). Die Bestimmung der Gesamtstaubemissionen erfolgte nach dem in den VDI-Richtlinien 2066 Blatt 1 [40] und Blatt 3 [41] beschriebenen Messverfahren (Methode mit "Filterkopfggerät"). Bei dieser Probenahme wird ein staubbeladener Teilgasstrom unter isokinetischen Bedingungen entnommen und einem Rückhaltesystem zur Staubabscheidung zugeführt. Als Abscheidemedium wurde ein Quarzfaserfilter (Retention 99,998 % gemäß DOP(0,3 μ m)) in einer Filterhülse im Rückhaltesystem eingesetzt, der aufgrund des geringen Durchmessers der Abgasmessstrecke ($D = 100$ mm) außerhalb des Abgaskanals angeordnet war. Je nach Erfordernis wurde das Absaugrohr und das Rückhaltesystem beheizt um eine Unterschreitung des Abgastaupunktes zu vermeiden. Nach der Quarzfaserhülse gelangt das Messgas in die Absaugapparatur. Diese besteht aus einer Einheit zur Gastrocknung, den Geräten zur Ermittlung des Volumenstromes sowie des Gaszustandes und einer Saugpumpe. Eine optische Durchflussanzeige dient zusätzlich der Kontrolle zwischen dem einzustellenden Soll- und Istwert.

Die Dauer einer Gesamtstaubprobenahme richtete sich nach der Dauer der Impaktorprobenahme und erfolgte über einen Zeitraum von 30 bis 120 Minuten. Parallel zu jeder Impaktorprobenahme wurden zwei Staubfilterhülsen beprobt. Die Beladung der Hülsen lag dabei zwischen 15 und 100 mg. Der Probengasdurchsatz lag in einem Bereich von 1 bis 2 Nm³/h. Die Bestimmung der Staubmasse erfolgte gravimetrisch mit einer elektronischer Präzisionswaage (Fa. Mettler, Auflösung: 0,1 mg) durch Einwiegen der unbeladenen und Rückwiegen der beladenen Messfilter gemäß VDI-Richtlinie 2066 Teil 1 [40]. Die Wägung sowie die Konditionierung der Filter wurde im Labor der Landtechnik Weihenstephan durchgeführt.

Partikelgröße und -verteilung. Die Analyse der Partikelgrößen und deren Verteilung erfolgte nach dem in der VDI-Richtlinie 2066 (Blatt 5) [39] beschriebenen Impaktor-Messverfahren (Impaktionsverfahren). Zur partikelgrößenabhängigen Auftrennung der Staubemission wird bei diesem Verfahren die unterschiedliche Trägheit von Partikeln ausgenutzt. Dazu wird ein repräsentativer Teilgasvolumenstrom durch eine Kaskade von Düsen- und Impaktionsplatten (Prallplatten) eines Impaktors geleitet. In den Bohrungen der Düsenplatte wird der partikelbeladene Abgasteilstrom jeweils beschleunigt und strömt in Richtung der Prallplatte (Abbildung 7). Partikel, die auf Grund ihrer Trägheit dem Gasstrom nicht folgen können, werden auf die Prallplatte geschleudert und bleiben haften. In den von Stufe zu Stufe kleiner werdenden Düsenbohrungen erhöht sich die Gasgeschwindigkeit wodurch der beprobte Staub in mehrere Fraktionen aufgeteilt wird. Als unmittelbares Ergebnis einer Impaktormessung erhält man durch Wägung die auf den einzelnen Sammelplatten impaktierten Partikelmassen.

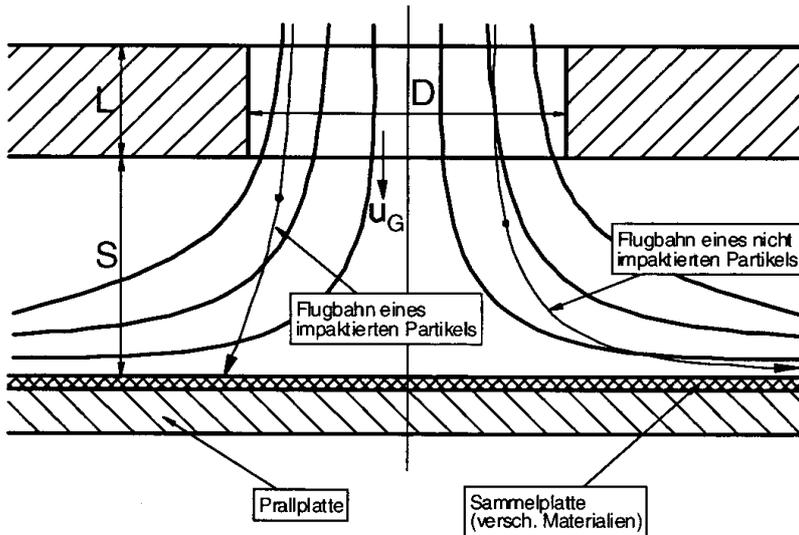


Abbildung 7: Partikelflugbahn

Um die impaktierten Partikelmassen einer Partikelgrößenklasse zuzuordnen zu können, ist der Abscheidegrad der einzelnen Impaktorstufen (= Wahrscheinlichkeit, mit der Partikel bestimmter Größe auf der Prallplatte impaktieren und dort haften bleiben) in Abhängigkeit von der Partikelgröße zu beschreiben. Unter der Annahme eines bestimmten Abscheidegrades ist damit jeder Impaktorstufe eine charakteristische Partikelgröße zuzuordnen. Als Maß für die Partikelgröße wird der aerodynamische Durchmesser (d_{ac}) herangezogen. Dieser ist für Partikel beliebiger Form und Dichte definiert als der Durchmesser einer Kugel mit der Dichte 1 (1 g/cm^3), die die gleiche Sinkgeschwindigkeit in ruhender oder laminar strömender Luft besitzt [4]. Der aerodynamische Durchmesser, bei dem eine Abscheidewahrscheinlichkeit von 50 % (Mediane der Partikelgrößenverteilung auf der Prallplatte) besteht, ist als der Grenzpartikeldurchmesser ($d_{ac 50}$) definiert. Er stellt die Trenngrenze zwischen zwei impaktierten Fraktionen dar. Bei relativ steiler Trennkurve der einzelnen Impaktorstufen (Abbildung 8) wird dabei vereinfachend angenommen, dass alle Partikel mit einem Durchmesser größer bzw. gleich dem Grenzpartikeldurchmesser der betreffenden Impaktorstufe und kleiner als dem Grenzpartikeldurchmesser der vorausgegangenen Stufe abgeschieden werden. Eine detaillierte Beschreibung der hier dargestellten Zusammenhänge findet sich in VDI-Richtlinie 2066 (Teil 5) [39].

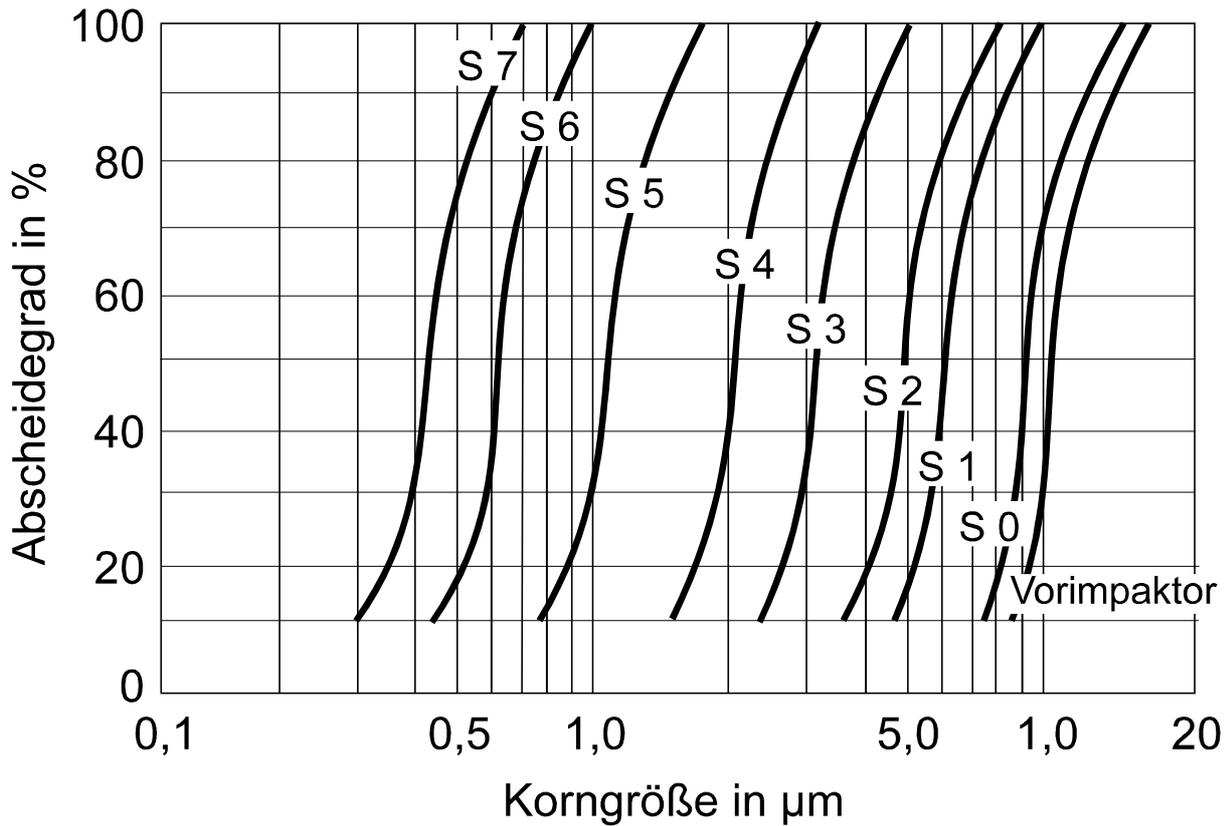


Abbildung 8: Trennlinien der Impaktorstufen (S) [1]

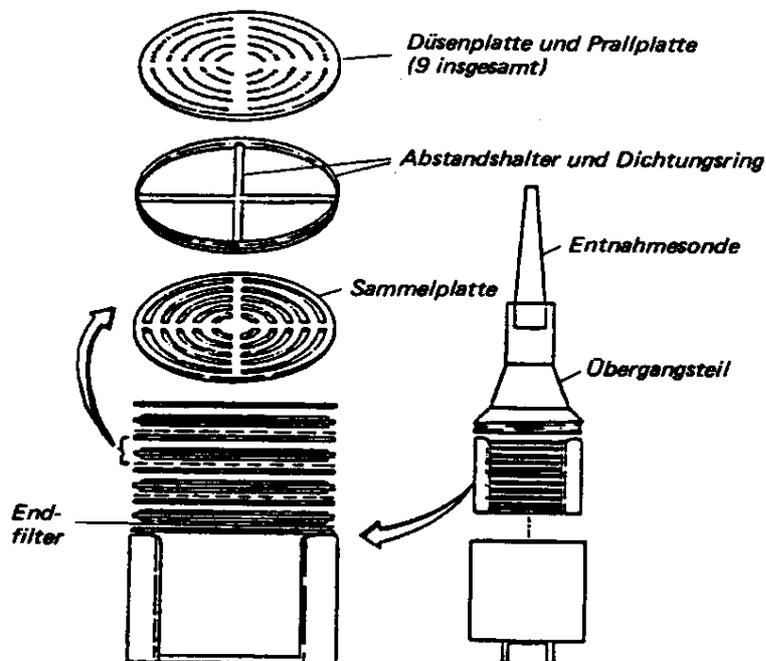


Abbildung 9: Schematische Darstellung des Kaskadenimpaktors (Fa. Andersen, Typ Mark III) [1]

Bei den durchgeführten Messungen wurde ein 9-stufiger Präzisions-Kaskadenimpaktor der Fa. Andersen (Typ Mark III, Abbildung 9) eingesetzt. Bei diesem Gerät sind die Prallplatten mit geeigneten Materialien (Sammelplatten) belegt und enthalten jeweils die Düsen der nachfolgenden Trennstufe. Die einzelnen Trennstufen sind in der Weise angeordnet, dass das staubbeladene Abgas von oben in den Impaktor eintritt, auf die erste Prallplatte trifft und von dieser unter Abscheidung der Grobpartikel ($d_{ac} > 13 \mu\text{m}$) durch deren Düsen in Richtung der zweiten Prallplatte abgelenkt wird. Von dort wird das Abgas unter Abscheidung der nächst kleineren Partikelgrößenklasse umgelenkt und strömt in einer dritten Ebene von oben mäanderförmig durch verschiedene Systemringe nach unten. Dabei erfolgt bei jedem Durchgang eine Abscheidung der für die jeweilige Trennstufe charakteristischen Partikelgrößenklasse. Partikel, die letzte Trennstufe passieren, werden in einem dem Impaktor nach geschalteten Endfilter zurückgehalten.

Um eine fehlerfreie Impaktion der Partikel zu erzielen, ist der Kaskadenimpaktor mit einem konstanten Gasvolumenstrom zu beaufschlagen. Zur Auftrennung möglichst kleiner Partikelgrößen ist zudem ein möglichst hoher konstanter Absaugvolumenstrom anzustreben. Bauart bedingt liegt der maximal absaugbare Gasvolumenstrom bei ca. $1,5 \text{ m}^3/\text{h}$. Bei den vorgenommenen Messungen wurde mit einem Gasvolumenstrom von ca. $1,0 \text{ m}^3/\text{h}$ im Betriebszustand abgesaugt, wodurch eine Fraktionierung im Partikelgrößenbereich von ca. $0,5$ bis $13 \mu\text{m}$ (bezogen auf d_{ac}) erfolgte, bei der drei Impaktorstufen die Partikel im Submikronbereich ($< 1 \mu\text{m}$) und fünf Stufen die Partikel im Größenbereich von 1 bis $10 \mu\text{m}$ trennen. Geringere Absaugvolumenströme bewirken dagegen eine Verschiebung der Partikelgrößenbereiche hin zu größeren Durchmessern

Der Kaskadenimpaktor wurde aus Platzgründen außerhalb des Abgaskanals angeordnet und die Düse mittels einer Schwanenhalssonde in die Messstrecke geführt. Um eine Kondensation des Probegases zu vermeiden, wurde das Impaktorgehäuse vor Beginn und während der Absaugung mit Hilfe einer Heizvorrichtung temperiert. Die nachgeschaltete Absaugapparatur entsprach der Apparatur, die bereits bei der Partikelmassenbestimmung verwendet wurde (siehe oben). Die Teilvolumenstromentnahme aus dem Hauptgasstrom erfolgte annähernd isokinetisch.

Die Dauer einer Impaktormessungen lag zwischen 60 bis 240 min, in denen Gesamtbeladungen von 10 bis 50 mg erzielt wurden. Die Wägung der Sammelplatten sowie deren Konditionierung wurde im Labor der Landtechnik Weihenstephan durchgeführt (vgl. Staubgehaltsmessung, Tabelle 8) und erfolgte nach VDI 2066, Blatt 5 [39].

Abweichend davon wurde jedoch auf eine Behandlung im Trockenschrank nach der Beladung der Sammelplatten verzichtet, um Masseverluste durch zu häufiges Handhaben der empfindlichen Filtermedien zu vermeiden. Die beladenen Sammelplatten wurden stattdessen mehrere Stunden im Exsikkator gelagert. Diese Methode wurde angewendet, da zahlreiche Sammelplatten oft nur unter einem Milligramm beladen waren. In Vorversuchen waren hierbei vernachlässigbar geringe Abweichungen der Methoden festgestellt worden, so dass die gewählte Vorgehensweise zulässig war. Zur Bewertung der Minderbefunde im Impaktor wurden die Konzentrationen aus den Messungen mit dem Filterkopfgerät herangezogen.

Die Auswertung der Impaktorprobenahme erfolgte mit Hilfe einer Auswertungsvorlage gemäß VDI 2066 Blatt 5, die vom IVD zur Verfügung gestellt wurde.

3.5.2 Brennstoffparameter

Als Brennstoffparameter wurde der Wassergehalt bestimmt. Ergebnisse hierzu sind im Kapitel 3.3 (Tabelle 7) aufgeführt.

Die Bestimmung des Wassergehalts erfolgte im Trockenschrank bei 105 °C nach DIN 51718 [11]. Je Probe wurde eine Zweifachbestimmung mit jeweils 200-800 g Einwaage (frisch) durchgeführt.

Analysen zur Bestimmung des Heizwertes und der Elementgehalte C, O, H, N, S, die für die Auswertungen und Emissionsberechnungen erforderlich sind, wurden hier nicht durchgeführt. Statt dessen konnte hierfür auf Werte aus der NAWARO-Datenbank der Landtechnik Weihenstephan zurückgegriffen werden [18], da diese Daten mit einer für die vorliegenden Messungen hinreichenden Genauigkeit verwendbar waren (vgl. Tabelle 10, S. 39).

3.6 Versuchsdurchführung

3.6.1 Inbetriebnahme und Vorversuche

Die Feuerungsanlagen wurde auf dem Prüfstand der Bayerischen Landesanstalt für Landtechnik aufgebaut und im Beisein von Vertretern des Herstellers in Betrieb genommen. Anschließend wurden Vorversuche mit den Prüfbrennstoffen durchgeführt, um mit der Bedienung der Anlage vertraut zu werden. Während der Vorversuche wurde außerdem der zu erwartende Gesamtstaubgehalt bestimmt, um so die günstigste Absaugdauer für die spätere Feinstaubprobenahme finden zu können. Die Feuerungsanlagen wurden gemäß den beiliegenden Bedienungsanleitungen betrieben. Die Regelungsparameter der Feuerungen entsprachen den vorgegebenen Werkseinstellungen.

Bei der Hackgutfeuerung wurde die Anlage mit dem Versuchsbrennstoff für die beiden gewählten Laststufen fest voreingestellt. Dabei wurde als Optimierungsgröße im Rahmen der technischen Möglichkeiten ein minimaler CO-Gehalt bei größtmöglichem CO₂-Gehalt im Abgas angestrebt. Die Einstellung der Hackgut-Feuerungsanlage erfolgte im wesentlichen durch Anpassung der Takt- und Pausenzeit der Zufuhrschnecke und der Mindestdrehzahl der beiden Verbrennungsluftgebläse an die erforderliche Wärmeleistung.

3.6.2 Durchführung der Verbrennungsversuche

Die Verbrennungsversuche wurden nach Abschluss der Vorbereitungen über den Zeitraum von Ende Mai 2000 bis Anfang August 2000 in enger Kooperation mit dem Projektpartner (Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen der Universität Stuttgart) durchgeführt. Die Durchführung wird nachfolgend beschrieben.

Anheizen und Beharrungszustand. Nach dem Befüllen des Tagesvorratbehälters oder Brennstofffüllraumes mit dem Versuchsbrennstoff wurde die Feuerungsanlage eingeschaltet und damit das Zündprogramm der elektronischen Verbrennungsregelung gestartet. Bei den beiden automatischen Anlagen leitete die Steuerung die automatische Zündung ein. Der Stückholzkessel wurde von Hand mit einem elektrischen Heißluftgebläse gezündet.

In der Phase des Anheizens erfolgte lediglich eine Zirkulation des Heizwassers im Kühlkreislauf. Die Kaltwassereinspeisung setzte erst ab einer Kesselwassertemperatur von ca. 60 °C ein. Dabei wurde der Kaltwasserdurchfluss auf die im Beharrungszustand erforderliche Wärmeleistung eingeregelt. Die Vorlauftemperatur lag gemäß DIN EN 303-5 [6] im Mittelwert zwischen 70 und 90 °C, und die Temperaturdifferenz zwischen Vorlauf und Rücklauf betrug 10 bis 25 K.

Der Beharrungszustand war erreicht, nachdem die Betriebs- und Abgasparameter einen annähernd gleichmäßigen Verlauf auf dem für die jeweilige Anlage charakteristischen Niveau zeigten. Bei den durchgeführten Verbrennungsversuchen lag diese Dauer bei etwa einer Stunde.

Durchführung der Messungen. Bei den automatisch beschickten Feuerungsanlagen wurde der Brennstoffvorratsbehälter nach Erreichen des Beharrungszustands mit einer ausreichenden Brennstoffmenge befüllt. Alle automatischen Reinigungsmechanismen der Feuerungsanlage (z. B. Wirbulatorschnecken, Ascheräumer auf dem Rost, Kipprost, Ascheustragung) wurden über die Dauer der Probenahme abgeschaltet.

Anschließend wurde die Messwertaufzeichnung gestartet und die Feinstaubprobenahme durchgeführt. Die Gesamtdauer der Messung richtete sich nach der Dauer der Impaktor-Probenahme. Zu jeder Feinstaub-Probenahme wurden zwei Gesamtstaubmessungen durchgeführt. Zu jeder Versuchsvariante erfolgte eine weitere Wiederholungsmessung über die gleiche Dauer und unter gleichen Betriebsbedingungen.

Bei den beiden manuell beschickten Stückholzkesseln wurde nach Erreichen des Beharrungszustandes (Ende der ersten Auflage) eine für die Probenahme ausreichende Brennstoffmenge nachgelegt. Hierbei wurde in Anlehnung der 1. BImSchV [15] der Beginn der Probenahme auf den Zeitpunkt 5 Minuten nach dem Auflegen gelegt.

Um eine messbare Belegung der Trennstufen sicherzustellen, wurde versucht, die Feinstaubprobenahme so lange wie möglich aufrecht zu erhalten, bis sich erste Anzeichen der Beladungsgrenze durch einen deutlichen Druckanstieg zeigten. Dieser Druckanstieg wird durch das Erreichen der Beladungsgrenze des Endfilters verursacht.

Beim Stückholzkessel kam es bei kleinster Wärmeleistung aufgrund von Brückenbildung des Prüfbrennstoffs zu Störungen im Verbrennungsprozess. Dies äußerte sich durch eine erhöhte Emission an Bestandteilen der unvollständigen Verbrennung, was die Standzeit des Endfilters wesentlich verkürzte. Somit konnte bei dieser Leistungsstufe in der Regel keine vollständige Brennstoffauflage beprobt werden. Aus diesem Grund wurde ein zusätzlicher Versuch mit Buchenscheitholz bei kleinster Wärmeleistung durchgeführt, damit der Vielfalt der möglichen Praxisbrennstoffe auf diese Weise zumindestens ansatzweise Rechnung getragen werden konnte.

Abschalten und Beenden. Nach Abschluss der letzten Probenahme wurde die Messwertaufzeichnung beendet und die Feuerungsanlage ausgeschaltet. Die Feuerungsanlage wurde über das Kühlsystem nachgekühlt, um ein nachträgliches Überhitzen zu verhindern. Insgesamt betrug die Betriebszeit der Feuerungsanlage während eines Verbrennungsversuches bzw. Versuchstages rund 9 Stunden (beim Hackschnitzel- und Pelletkessel) bzw. bis 12 Stunden (beim Scheitholzkessel).

Laststufenabsenkung. Als Heizlaststufen wurden 100 % (Nennwärmeleistung, NWL) und eine kleinste Wärmeleistung (KWL) gewählt, letztere wurde nicht nach den entsprechenden Angaben der Hersteller sondern nach den für die Feuerungsbauart typischen Werten festgelegt. Bei den automatisch beschickten Kesseln wurde zusätzlich eine "mittlere Wärmeleistung" (MWL) angesteuert. Die tatsächlich erreichten Laststufen können versuchsbedingt leicht über oder unter den Zielwerten liegen; entsprechend werden die Mittelwerte der tatsächlich erreichten Heizlaststufen in Tabelle 9 zusammengestellt.

Tabelle 9: *Gemessene Laststufen und Lastschwankungen bei den Wiederholungen. NWL: Nennwärmeleistung; MWL mittlere Wärmeleistung; KWL kleinste Wärmeleistung*

Bezeichnung	NWL (Ziel) (kW)	erreichte Leistung für NWL		MWL (Ziel) (kW)	erreichte Leistung für MWL		KWL ¹⁾ (Ziel) (kW)	erreichte Leistung für KWL	
		in % der NWL (kW)	in % der NWL		in % der NWL (kW)	in % der NWL		in % der NWL (kW)	in % der NWL
Stückholzkessel "modern"	30	28,6 (27,7-29,4)	95,3	---	---	---	15	15,7 (15,5-15,9)	52,3
Stückholzkessel "alte Technik"	33	31,1 (30,3-31,9)	94,2	---	---	---	15	24,1 (23,5-24,6)	73,0
Hackgutkessel w=15%	50	52,9 (52,9-53,0)	106,0	30	32,6 (32,6-32,7)	65,3	15	14,4 (13,6-15,3)	28,8
Hackgutkessel w=35%	50	47,8 (46,5-49,1)	95,6	30	30,6 (30,5-30,8)	61,3	15	13,1 (13,1)	26,1
Pelletkessel	15	15,1 (15,1-15,2)	101,0	10	9,9 (9,6-10,3)	66,2	5	5,3 (5,3-5,4)	35,7

¹⁾ nicht nach Herstellerangaben sondern nach bauarttypischen Werten festgelegt

Für die Interpretation der Ergebnisse der Hackgutfeuerung sei hier auf eine Besonderheit bei der Betriebsweise hingewiesen. Während die Leistungsstufen NWL und MWL im (fest voreingestellten) kontinuierlichen Betrieb gefahren werden konnten, ließ sich die kleinste Laststufe nur durch einen intermittierenden Betrieb, d. h. durch einen Betrieb mit ständigem Wechsel zwischen Nennwärmelast und Gluterhalt (Naturzugbetrieb), einstellen. Derartige Betriebsweisen sind in der Regel mit negativen Folgen für das Niveau des Schadstoffausstoßes verbunden (Kapitel 4.1.1).

Wassergehaltsänderung. Bei den Versuchen zum Wassergehaltseinfluss in der Hackschnitzel-feuerung war eine Anpassung der Einstellungen an die unterschiedlichen Wassergehalte erforderlich. Die für lufttrockenes Fichtenhackgut (w = 15 %) gefundene Einstellung des Brennstoffmassenstromes musste aufgrund des geringeren Heizwertes bei feuchtem Hackgut (w = 35 %) erhöht werden. Ähnliche Veränderungen wurden auch für die Gebläse-Mindestdrehzahl vorgenommen. Die CO-Emissionen, auf die sich die Feuerungsanlage schließlich auch beim hohen Wassergehalt im Versuch einregeln ließ, kann als die Geringstmögliche mit diesem Brennstoff betrachtet werden.

3.7 Auswertung der Abgas- und Feinstaubuntersuchungen

Zur Auswertung und Verrechnung der Mess- und Analysedaten wurde die an der Bayerischen Landesanstalt für Landtechnik entwickelte Auswertungsdatei FMDA 9.3 sowie die am IVD Stuttgart entwickelte Impaktor-Auswertungsdatei IMPAUS (Stand 09/00) zusammen mit der Tabellenkalkulationssoftware MS Excel 5.0 verwendet. Die Vorgehensweise wird nachfolgend beschrieben.

3.7.1 Abgas

Schadstoffemissionen. In einem ersten Auswertungsschritt wurden die Abgaskenngrößen Luftverhältniszahl, Normdichte, Normvolumenstrom und Massenstrom als Minutenmittelwerte aus den Messwerten berechnet. Anschließend wurden Mittelwerte der berechneten und gemessenen Werte über die Dauer der Impaktor- und Staubprobenahme gebildet. Sämtliche erfassten Schadstoffemissionen wurden sowohl als Massenkonzentrationen (mg/Nm^3 bei Bezugszustand 13 % O_2), als auch als energiemengenbezogene Emissionen ($\text{mg}/\text{MJ } H_{u(\text{roh})}$) ausgewiesen.

Die C_nH_m -Emissionen wurden als organisch gebundener Kohlenstoff (Gesamt-C bzw. VOC) bezogen auf trockenes Abgas und die NO_x -Emissionen als NO_2 angegeben. Neben der tabellarischen Ausgabe in formatierten Datenblättern erfolgte eine grafische Darstellung ausgewählter Messgrößen als Zeitverläufe (s. Anhang).

Wärmeleistung und Wirkungsgrad. Mit den Daten zur Brennstoffzusammensetzung und den Momentanwerten der Abgaskenngrößen, Temperaturen und Wasserverbrauch erfolgte die Berechnung der Kessel- und Feuerungswärmeleistung, des feuerungstechnischen Wirkungsgrads und des Kesselwirkungsgrads (nach der direkten Methode) gemäß den Berechnungsvorgaben der DIN EN 303-5 [6]. Dazu wurden der Kühlwasservolumenstrom und dessen Temperatur im Kesselein- und Vorlauf kontinuierlich erfasst sowie die verbrauchte Brennstoffmasse bestimmt.

Die Mittelwertbildung der Momentanwerte wurde wie bei den Schadstoffemissionen über die Dauer der Impaktorprobenahme durchgeführt. Die Ergebnisausgabe erfolgte tabellarisch in formatierten Datenblättern.

3.7.2 Feinstaub und Gesamtstaub

Gesamtstaubgehalt. Die Auswertung der Staubprobenahme erfolgte in eigenen Berechnungsblättern. Dabei wurden zuerst die abgesaugten Normvolumina aus den gemessenen Gasmengen und Gaszuständen bestimmt. Mit diesen Zwischenergebnissen wurden dann die ermittelten Staubmengen der Hülsen auf Massenkonzentrationen umgerechnet. Aus mehreren Gesamtstaubprobenahmen (mindestens zwei) wurde über die Dauer einer Impaktorprobenahme ein zeitlich gewichteter Mittelwert des Staubausstößes gebildet.

Die Filtermedien wurden im Trockenschrank bei $240\text{ }^\circ\text{C}$ eine Stunde lang ausgeheizt. Anschließend wurden sie im Exsikkator über eine weitere Stunde abgekühlt und konditioniert. Danach wurden sie einzeln entnommen und mit einer Präzisionswaage gewogen und bis zur weiteren Verwendung staubfrei gelagert. Die belegten Filter wurden wiederum im Trockenschrank bei $105\text{ }^\circ\text{C}$ eine Stunde lang getrocknet, eine weitere Stunde im Exsikkator konditioniert und abschließend auf der Waage zurückgewogen.

Feinstaubgehalt. Die Auswertung der Feinstaubprobenahme erfolgte analog zur Bestimmung des Gesamtstaubgehaltes mit der vom IVD Stuttgart entwickelten Auswertungsvorlage. Die Gesamtstaubmenge der Feinstaubprobenahme ergab sich aus der Summe der auf den einzelnen Impaktorstufen bestimmten Staubmengen. Dieser Summenwert ermöglicht eine Einschätzung über die Partikelverluste im Impaktor. Über die Höhe dieser Verluste, die wesentlich von der Bauart des Impaktors und von den Eigenschaften der Partikel abhängen, werden hier jedoch keine Auswertungen vorgestellt; statt dessen sei hierzu auf die umfangreichen Ergebnisse weiterführender messtechnischer Vergleichsuntersuchungen hingewiesen (z. B. [14]).

Die Verlustanteile aus der Schwanenhalssonde und im Konus wurden zusätzlich getrennt erfasst. Sie wurden jedoch nicht in die weitere Auswertung des Feinstaubgehaltes mit aufgenommen (siehe Anhang „Randbedingungen bei der Partikelprobenahme“).

Da zu jeder Versuchsvariante 2 bis 3 Impaktorprobenahmen durchgeführt wurden, konnte aus den Einzelmessungen eine Mittelwertbildung erfolgen. Als Bedingungen für die Berücksichtigung einer Einzelmessung wurden festgelegt:

- vergleichbare Verbrennungsbedingungen während der Impaktorprobenahme,
- fehlerlose und störungsfreie Abgasprobenahme,
- relative Abweichung der Trenngrenze vom Mittelwert bei weniger als 10 % für jede Impaktorstufe,
- Abweichung der Einzelwerte (in %) vom Mittelwert (in %) bei weniger als 5 % für jede Impaktorstufe.

Die Detaildaten sind in einer eigenen Datendatei zusammengestellt.

Die Ergebnisse wurden als Massenkonzentration, Säulendiagramme und als Summenkurve dargestellt. Die Partikelgrößenanteile wurden zudem für die übliche Angabe von PM_{10} , $PM_{2,5}$ und PM_1 zusammengefasst.

3.7.3 Brennstoffe

In den Auswertungen wurde der nach DIN 51 718 [11] bestimmte Wassergehalt berücksichtigt (Tabelle 7, S. 24). Bei den Auswertungen wurden außerdem die Elementgehalte für C, O, H, S und N als Tabellenwerte hinterlegt. Diese in der Verbrennungsrechnung verwendeten Werte sind in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10: *Elementgehalte der verwendeten Brennstoffe*

Brennstoffart	Heizwert H_u (kJ/kg TM)	Elementgehalte, bezogen auf die Trockenmasse (TM) (kg/kg TM)				
		C	O	H	S	N
Buchenholz mit Rinde	18 420	0,4790	0,4521	0,0620	0,0002	0,0022
Fichtenholz mit Rinde	18 820	0,4974	0,4325	0,0627	0,0002	0,0013
Holzpellets	19 076	0,4696	0,4602	0,0645	0,0015	0,0007

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Einfluss auf Standardemissionsgrößen (CO, VOC, Gesamtstaub)

Unter den Standard-Emissionsgrößen werden nachfolgend die Emissionen von Kohlenstoffmonoxid (CO), organische gasförmige Stoffe (VOC) und Partikelmasse (Staub) zusammengefasst. Die Parameter Kohlenmonoxid und Gesamtpartikelmasse bilden oft die Basis für die feuerungstechnische Beurteilung von Feuerungsanlagen; in Tabelle 11 sind diese Emissionsergebnisse differenziert nach Feuerungsanlage, Brennstoff und Leistungsstufe zusammengefasst. Die ebenfalls gemessenen NO_x-Emissionen sowie die feuerungstechnischen Wirkungsgrade und die Kesselwirkungsgrade finden sich in Anhang 7.1.3 (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

Tabelle 11: Übersicht über die Messergebnisse zu den Emissionsparametern CO, VOC und Gesamtstaub. *NWL Nennwärmeleistung, MWL mittlere Wärmeleistung, KWL kleinster Wärmeleistung*

Feuerungstyp	Brennstoff	CO			VOC			Gesamt-Staub		
		mg/Nm ³ bez. auf 13% O ₂								
		NWL	MWL	KWL	NWL	MWL	KWL	NWL	MWL	KWL
Stückholzkessel, "modern"	Fichtenscheite	324	---	1 326	9,1	---	219	35,5	---	20,5
	Buchenscheite ¹⁾	---	---	494	---	---	20	---	---	13,2
Stückholzkessel, "alte Technik"	Fichtenscheite	4 724	---	4 537	386	---	416	143	---	189
Hackgutfeuerung, (Neuanlage)	Hackgut, w = 15 %	200	52	1 092	1,0	1,0	94,0	31,0	22,0	28,5
	Hackgut w = 35 %	196	48	2 374	1,7	1,0	115	17,0	12,0	30,0
Pelletkessel, (Neuanlage)	Holzpellets	65	51	101	2,2	5,4	5,7	20,0	15,0	15,0

¹⁾ Zusatzversuch aufgrund von Brückenbildung bei Fichtenscheitholz

Eine Probenahme mit Buchenscheitholz wurde zusätzlich bei kleinster Wärmeleistung durchgeführt, da bei dieser Leistungsstufe mit Fichtenscheitholz Störungen im Abbrandverlauf durch Brennstoffbrückenbildung aufgetreten waren. Deutliche Unterschiede zwischen den Auswirkungen sind hierbei besonders im erhöhten Kohlenmonoxidgehalt zu erkennen.

4.1.1 Anlagentechnologie- und Laststufeneinfluss

CO-Emission. Die Ergebnisse in Abbildung 10 zeigen, dass die CO-Emission moderner Holzfeuerungen bei den Leistungsstufen Nennwärmeleistung (NWL) und mittlere Wärmeleistung (MWL) mit Werten von meist unter 200 mg/Nm³ auf einem relativ niedrigen Niveau liegen, verglichen

mit dem derzeit gültigen Grenzwert der 1. BImSchV [15], der bei $4\,000\text{ mg/Nm}^3$ und damit bei deutlich mehr dem 10-fachen der gemessenen Werte liegt. Wie erwartet sind die CO-Emissionen beim Pelletkessel in der Regel am günstigsten. Das ist auf die vorteilhafte Brennstoffstruktur zurückzuführen, die unter anderem eine sehr gleichmäßige Beschickung erlaubt; außerdem ist der Wassergehalt im Brennstoff, der hier bei 8 % lag, besonders niedrig.

Auffällig ist außerdem, dass der Anlagenvergleich beim Kohlenmonoxid besonders deutlich zu Gunsten des Pelletkessels ausfällt, wenn nur die Ergebnisse für den kleinsten Wärmeleistungsbereich betrachtet werden. Hier ist bei Scheitholz aber auch bei Holzhackschnitzeln mit Nachteilen zu rechnen, so dass diese Betriebszustände nach Möglichkeit vermieden werden sollten. Das kann zum Beispiel durch Verwendung eines ausreichend großen Pufferspeichers erfolgen.

Beim Vergleich der Teillastbetriebszustände darf allerdings nicht übersehen werden, dass die Hackschnitzelfeuerung und die Pelletfeuerung mit ca. 30 bis 35 % der Nennwärmeleistung eine größere Lastabsenkung erreicht, als die Stückholzfuehrung ("modern"), deren kleinste Wärmeleistung bei über 50 % der Nennwärmeleistung lag (vgl. Tabelle 9, S. 36). Zudem hatte sich der Brennstoff Fichtenholz als besonders problematisch erwiesen, da er bei starker Lastabsenkung besonders zur Brückenbildungsneigung im Feuerraum neigt. Diese Beobachtung kann hier zum größten Teil für das relativ hohe Emissionsniveau beim Kohlenmonoxid verantwortlich gemacht werden. Das wird durch den speziell aus diesen Gründen durchgeführten Zusatzversuch mit Buchenscheitholz belegt. Bei Buchenholz treten Brückenbildungen wesentlich seltener auf, so dass der CO-Ausstoß allein durch den Wechsel der Holzart bei kleinster Wärmeleistung um mehr als 60 % abgesenkt werden kann (vgl. hierzu Tabelle 11). Bei Feuerungen, die häufig in diesem ungünstigen Lastbereich betrieben werden (z. B. infolge zu geringer Wärmespeichervolumina), ist dieser Brennstoff daher zu bevorzugen.

Bei der Interpretation der Ergebnisse der Hackschnitzelfeuerung im Teillastbetriebszustand (MWL, KWL) ist eine anlagentechnische Besonderheit zu beachten. Die kleinste Leistungsstufe wird hier bauartbedingt durch einen intermittierenden, d. h. durch einen Betrieb mit ständigem Wechsel zwischen Nennwärmelast und Gluterhalt (Naturzugbetrieb), eingestellt. Dadurch ergeben sich zwangsläufig inkonstante Verbrennungsbedingungen mit entsprechenden Nachteilen beim Schadstoffausstoß. Allerdings ist dieses besonders ungünstige Teillastverhalten nicht als typisch – auch nicht für den gewählten Anlagentyp – anzusehen.

Im Gegensatz zur kleinsten Wärmeleistung stellt der mittlere Leistungsbereich bei Holzhackgut den günstigsten Betriebszustand für die untersuchte Anlage dar; hier besteht sogar Gleichstand zu dem CO-Ausstoß des Pelletkessels.

Die gemessenen Ergebnisse für die organischen Stoffe (VOC) ergeben eine analoge Tendenz zu den Kohlenmonoxidemissionen und werden daher in Abbildung 10 nicht gesondert dargestellt. Sie sind in Tabelle 11 zusammengefasst.

Gesamtstaub-Emission. Die Gesamtstaub-Emissionen liegen ebenfalls auf einem relativ niedrigen Niveau. Mit Werten um oder unter 30 mg/Nm^3 unterschreiten sie den derzeit gültigen Grenzwert der 1. BImSchV (150 mg/Nm^3) deutlich. Wie erwartet weist auch hier der Pelletkessel die niedrigsten Staubemissionen auf; das liegt daran, dass es sich bei den Holzpellets um einen be-

sonders aschearmen Brennstoff handelt, da dieser in der Regel aus entrindetem Material hergestellt wird.

Anders als bei den CO-Emissionen sind die anlagenbedingten Unterschiede beim Staubausstoß insgesamt relativ gering, zumal sie kaum wesentlich über den üblichen Messwertschwankungen liegen. Vor allem zwischen der Hackgutfeuerung und dem Scheitholzessel sind keine nennenswerten Veränderungen erkennbar; hier war der gleiche Brennstoff lediglich in unterschiedlicher Aufbereitungsform verwendet worden.

Die gemessenen Unterschiede beim Staubausstoß sind demnach offenbar weniger auf die Anlagenbauart als vielmehr auf die Laststufe zurückzuführen. Die mittlere und kleinste Leistungsstufe ergaben erwartungsgemäß niedrigere Staubemissionen als die Versuche bei Nennwärmeleistung. Diesen generellen Trend bestätigen auch die in einem anderen Vorhaben an der Landtechnik Weihenstephan durchgeführten Untersuchungen, die in der Mehrzahl der Messungen eine sichtbare Absenkung des Staubausstoßes während des Teillastbetriebes zeigten [31].

Beim Hackgutkessel ist der Wiederanstieg bei der kleinsten Wärmeleistung vermutlich auf die intermittierende Betriebsweise (siehe oben) zurückzuführen.

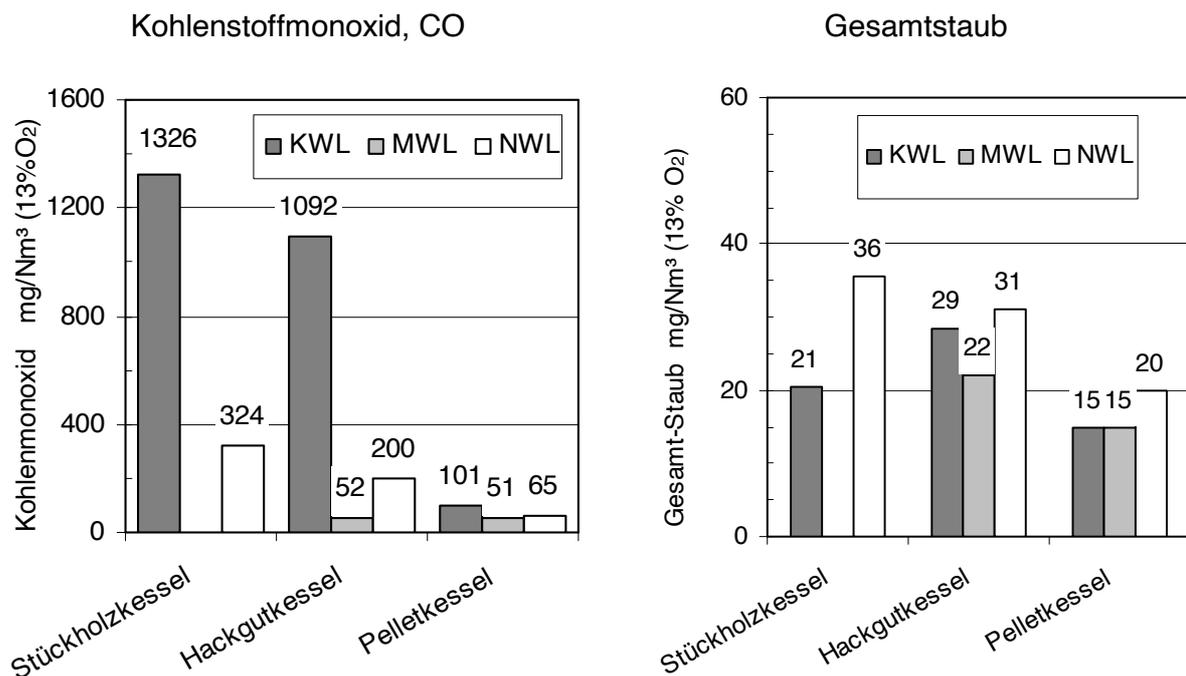


Abbildung 10: Kohlenmonoxid- und Gesamtstaubemission bei den drei Holzfeuerungen moderner Bauart. NWL: Nennwärmeleistung (Scheitholzessel: 30 kW, Hackgutkessel: 50 kW, Pelletkessel: 15 kW), MWL mittlere Wärmeleistung (hier: 33 bzw. 10 kW), KWL kleinste Wärmeleistung (hier 16, 14 bzw. 5 kW)

4.1.2 Entwicklungsstand

Für die Betrachtung unterschiedlicher technologischer Entwicklungsstände wurde ein moderner gebläsebetriebener Stückholzkessel (vgl. Kapitel 3.2.1) mit einem naturzugbetriebenen Stückholzkessel älterer Bauart verwendet (vgl. Kapitel 3.2.2). Die Ergebnisse dieser Verbrennungsversuche sind in Abbildung 11 für die Abgas-Emissionsgrößen CO und Staub dargestellt. Zusammen mit den VOC-Emissionen sind alle Einzelergebnisse in Tabelle 11 ablesbar.

CO-Emission. Die Ergebnisse in Abbildung 11 zeigen, dass die CO-Emission bei der alten Verbrennungstechnik um ein Mehrfaches über den Werten des modernen Kessels liegen. Bei dem für die Anlagebeurteilung wichtigen Nennwärmeleistungsbetrieb überschreiten sie die Emission des modernen Kessels sogar um mehr als das 14-fache. Diese Unterschiede lassen sich vor allem durch die Tatsache erklären, dass – im Unterschied zum "modernen" Scheitholzkessel – diese Feuerung weder über ein Zuluftgebläse noch über eine räumliche Trennung von Entgasungszone und heißer Nachverbrennung verfügt, da die Wärmetauscherflächen die unmittelbare Abgrenzung des Feuerraumes bilden. Dadurch werden die Flammen und Brenngase bereits während der Verbrennung abgekühlt, so dass ein möglichst vollständiger Ausbrand nicht erfolgen kann und statt dessen ein hoher Anteil unverbrannter Bestandteile im Abgas mitgeführt wird. Das ist nicht nur am Kohlenmonoxidausstoß abzulesen, sondern auch an der VOC-Emission, die bei Nennwärmeleistung auf mehr als das 35-fache der modernen Feuerung ansteigt (Tabelle 11).

Die Verringerung der Laststufe (von 100 % auf 73 %, vgl. Tabelle 9, S. 36) wirkt sich dagegen beim Altkessel angesichts des ohnehin hohen Emissionsniveaus nicht weiter nachteilig auf den CO-Ausstoß aus. Beim modernen Kessel ist er vor allem auf die Brückenbildung im Feuerraum zurückzuführen, die aber brennstoffabhängig ist und bei Verwendung von Buchenholz in der Regel nicht auftritt (vgl. CO-Emissionen in Tabelle 11). Aus Gründen der Vergleichbarkeit werden in Abbildung 11 jedoch die ungünstigen Teillastergebnisse aus dem Fichtenholzversuch dargestellt, hier war die gleiche Brennstoffcharge wie in der Altanlage eingesetzt worden.

Gesamtstaub-Emission. Auch die Gesamtstaub-Emissionen liegen beim Altkessel mit etwa dem 4-fachen (NWL) bzw. dem 9-fachen (KWL) deutlich über denen des modernen Scheitholzkessels. Untypisch für modernere Scheitholzkessel ist allerdings der Anstieg im Teillastbetriebszustand (KWL).

Die Deutlichkeit, mit der die Staubwerte sich hier bei den beiden "technologischen Reifezuständen" der Feuerung unterscheiden, weist auf das Vorhandensein erhöhter Kondensatmengen im Abgas des Altkessels hin. Durch die im Verdünnungstunnel stattfindende Abkühlung fallen Kohlenstoff (Ruß) und teerhaltige Bestandteile als Partikelmasse an, die als Staubemission gemessen wird.

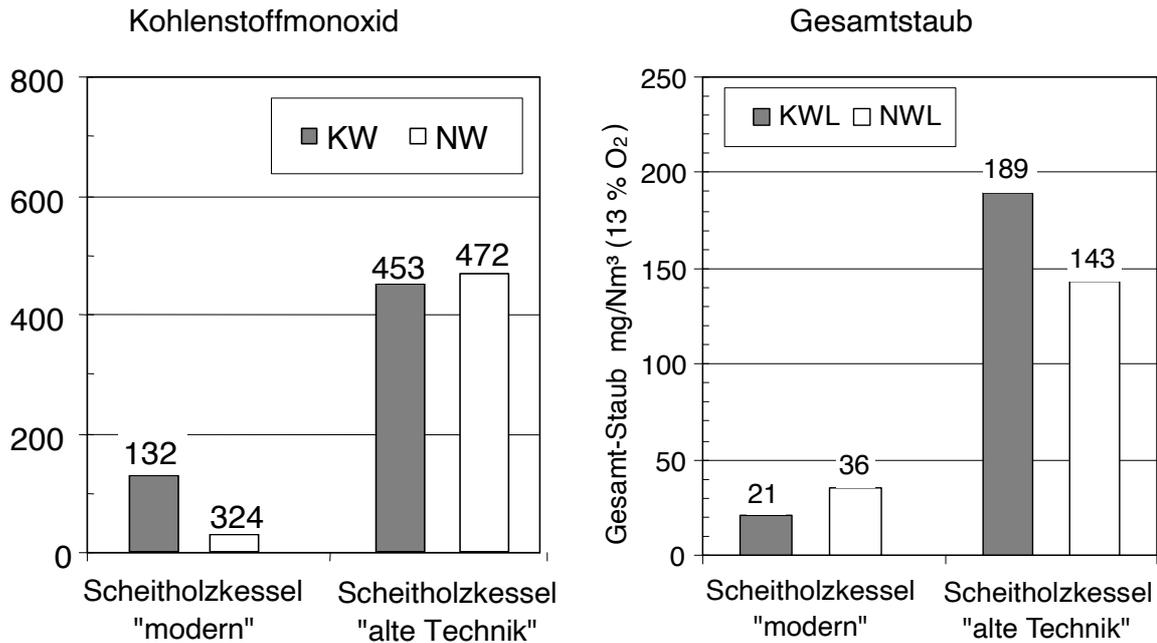


Abbildung 11: Kohlenmonoxid- und Gesamtstaubemission bei den Scheitholzkesseln moderner und alter Bauart. NWL: Nennwärmeleistung ("modern": 30 kW, "alte Technik": 33 kW) KWL kleinste Wärmeleistung (hier: 16 bzw. 24 kW)

4.1.3 Brennstoffwassergehalt

CO-Emission. Die Ergebnisse in Abbildung 12 zeigen, dass die CO-Emission bei den beiden Laststufen mit kontinuierlicher Betriebseinstellungen (NWL und MWL) bei beiden Wassergehaltsstufen stets am geringsten sind. Unterschiede, die auf den Wassergehalt zurückzuführen sind, zeigen sich nicht; offenbar besteht innerhalb der untersuchten Wassergehaltsspanne eine hohe Anpassungsfähigkeit an wechselnde Brennstofffeuchten. Das gilt jedoch nicht für die kleinste Wärmeleistung, die im vorliegenden Fall durch eine intermittierende Betriebsweise, d. h. durch einen ständigen Wechsel zwischen Nennwärmelast und Gluterhalt (Naturzugbetrieb) erreicht wurde. In diesem Betriebszustand wirken sich höhere Wassergehalte überproportional stark nachteilig aus.

Die Vorteile der mittleren Laststufe gegenüber dem Nennleistungsbetriebszustand deuten darauf hin, dass die Feuerraumgeometrie und -größe bei dieser Anlage für eine unterhalb der Nennwärmeleistung liegende Auslastung ausgelegt ist. Hier wirkt sich offenbar die gängige Praxis der Hersteller aus, bei der abgestufte Anlagenleistungen innerhalb einer angebotenen Baureihe häufig lediglich durch veränderte Wärmetauschergrößen erzielt werden. Der aus Sicht der Verbrennungsqualität optimale Heizlastpunkt kann sich somit von der sonst allgemein üblichen Nennwärmeleistung in Richtung des Teillastbetriebszustands verschieben.

Analog zu den Kohlenmonoxidemissionen verhalten sich auch die VOC-Emissionen (vgl. Tabelle 11), allerdings sind die Nachteile beim Betrieb mit kleinster Wärmeleistung nochmals deutlich größer, als bei den beiden übrigen Laststufen, bei denen eine kontinuierliche Betriebsweise möglich war.

Gesamtstaub-Emission. Beim Gesamtstaub liegen die Emissionen bei der trockenen Brennstoffvariante tendenziell höher, als bei der feuchten, wobei in beiden Fällen die mittlere Laststufe (MWL) am günstigsten war. Inwieweit bei der kleinsten Wärmeleistung bereits Partikel aus unverbrannten Abgasbestandteilen anfallen, kann aufgrund des vorliegenden Datenmaterials nicht festgestellt werden. Insgesamt jedoch ist das Niveau des Staubaustoßes relativ niedrig, und die gemessenen Unterschiede liegen kaum wesentlich über den üblichen Messwertschwankungen.

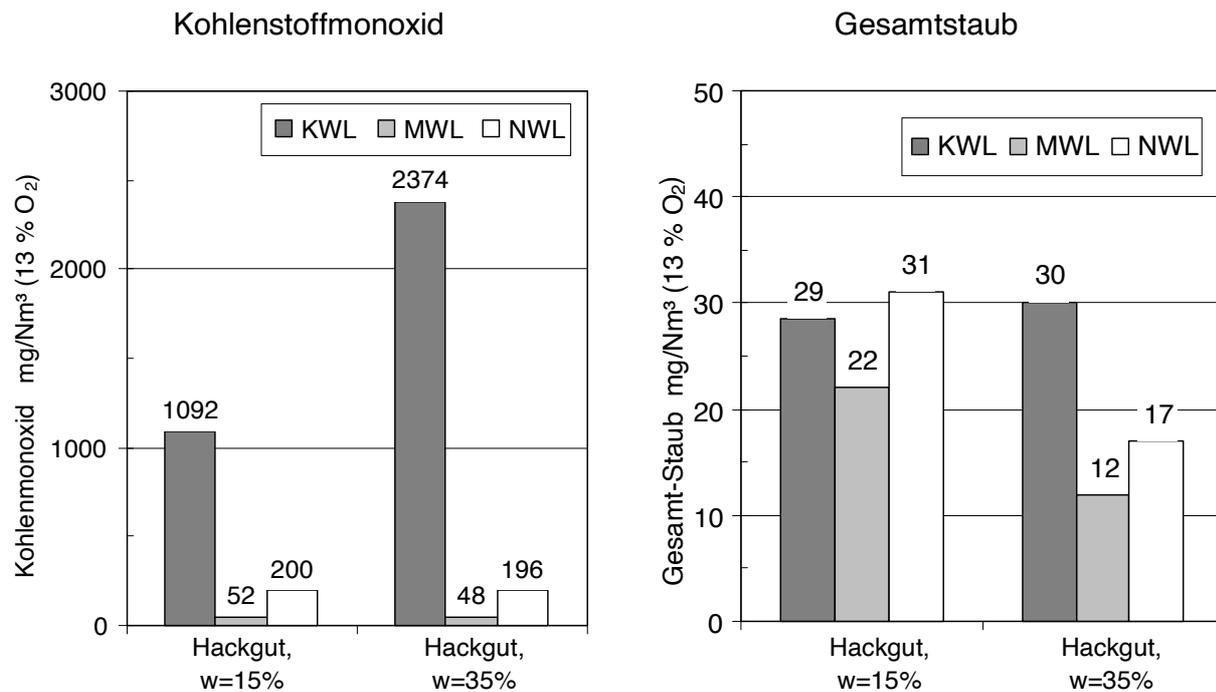


Abbildung 12: Kohlenmonoxid- und Gesamtstaubemission bei unterschiedlichen Brennstoffwassergehalten in der untersuchten Hackgutfeuerung. NWL: Nennwärmeleistung (50 kW), MWL mittlere Wärmeleistung (hier: 33 bzw. 31 kW), KWL kleinste Wärmeleistung (hier: 13 bzw. 14 kW)

4.2 Einfluss auf die Partikelgrößenverteilung der Staubemission

Da der Probengasvolumenstrom bei den Messungen stets in unterschiedlichem Maß schwankt, ergeben sich auch für die jeweiligen Trenngrenzen der Partikelgrößenklassen uneinheitliche Werte, so dass die gemessenen Korngrößenangaben nicht unmittelbar vergleichbar sind. Durch Interpolation können jedoch die abgeschiedenen Mengen für bestimmte Ziel-Korngrößen errechnet werden; beispielsweise werden im Bereich des Emissionsschutzes häufig Grenzwerte für die aerodynamischen Partikeldurchmesser von $\leq 1,0 \mu\text{m}$ (PM_{10}), $\leq 2,5 \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2,5}$) und $\leq 10 \mu\text{m}$ (PM_{10}) festgelegt. Diese Interpolationsergebnisse ermöglichen einen direkten Vergleich einzelner Messwerte; sie sind für sämtliche hier durchgeführte Messungen in Form der Mittelwerte aus je zwei Wiederholungen in Tabelle 12 vollständig dargestellt.

Tabelle 12: Anteile der im Impaktor abgeschiedenen aerodynamischen Partikeldurchmesser bis 1, 2,5 bzw. 10 μm (PM_1 , $PM_{2,5}$, PM_{10}). Dargestellt sind die Mittelwerte für die Versuchsvarianten aus jeweils zwei Messungen

		Anteile der Partikelmasse in % der abgeschiedenen Gesamt-Partikelmasse ¹⁾								
Feuerungstyp	Brennstoff	NWL			MWL			KWL		
		PM_1	$PM_{2,5}$	PM_{10}	PM_1	$PM_{2,5}$	PM_{10}	PM_1	$PM_{2,5}$	PM_{10}
Stückholzkessel, "modern"	Scheite (Fichte)	34,5	46,2	78,7	---	---	---	69,0	76,7	93,5
	Scheite (Buche)	---	---	---	---	---	---	76,9	81,9	91,4
Stückholzkessel ¹⁾ , "alte Technik"	Scheite	78,9	88,9	96,7	---	---	---	82,4	89,7	96,8
Hackgutfeuerung, (Neuanlage)	Hackgut, w = 15 %	89,2	91,5	95,8	92,9	95,5	99,4	84,4	88,7	96,0
	Hackgut w = 35 %	64,5	66,5	78,5	89,8	92,6	97,5	84,6	88,8	96,5
Pelletkessel, (Neuanlage)	Holzpellets	62,4	68,4	94,6	89,0	91,6	98,7	91,1	93,9	99,1

¹⁾ Mittelwerte über jeweils zwei Probenahmen

Aufgrund der besonderen Problematik der kleinsten Abgaspartikel (vgl. Kapitel 1) konzentrieren sich die nachfolgenden Betrachtungen auf den Partikelgrößenbereich, der als "Submikronpartikel" (aerodynamischer Partikeldurchmesser $d_{ae} < 1 \mu\text{m}$) definiert ist.

In den nachfolgenden Kapiteln 4.1.1, 4.1.2 und 4.1.3 werden Einflüsse der Anlagenart und der Laststufe sowie des technologischen Entwicklungsstandes und des Wassergehalts separat anhand der grafischen Darstellungen der Partikelgrößenverteilungen (Abbildung 13, Abbildung 15, Abbildung 16) vorgestellt und diskutiert. Darin werden die impaktierten Partikelmassenanteile als Verteilungssummen in Abhängigkeit vom aerodynamischen Partikeldurchmesser dargestellt (siehe Erläuterungen in Kapitel 3.7.2).

4.2.1 Anlagentechnologie- und Laststufeneinfluss

Beim Einsatz von Scheitholz (im "modernen" Heizkessel) ist der Anteil sehr feiner Stäube deutlich geringer als bei den Schüttgutbrennstoffen Hackschnitzel und Pellets. Beim Scheitholz tragen die Submikronteilchen im Nennwärmelastzustand nur etwa 35 % zur Gesamt-Partikelmasse bei, während bei vergleichbaren Heizlaststufen eines Pellet- bzw. Hackschnitzelkessels zwischen 62 und 89 % auf diese Korngrößenklasse entfallen (Tabelle 12).

Diese Beobachtung lässt sich auch anhand des Verlaufs der Partikelgrößenverteilung in Abbildung 13 ablesen. In beiden Laststufen (NWL und KWL) weist die Scheitholzfeuerung den geringsten Anteil feiner Partikel auf; allerdings verringern sich die Unterschiede mit der Heizlast tendenziell. Bei Holzhackgut ist der Anteil der feineren Staubfraktionen in der Regel größer als

beim Pelletkessel, jedoch waren diese Unterschiede lediglich beim Nennwärmeleistungsversuch besonders ausgeprägt.

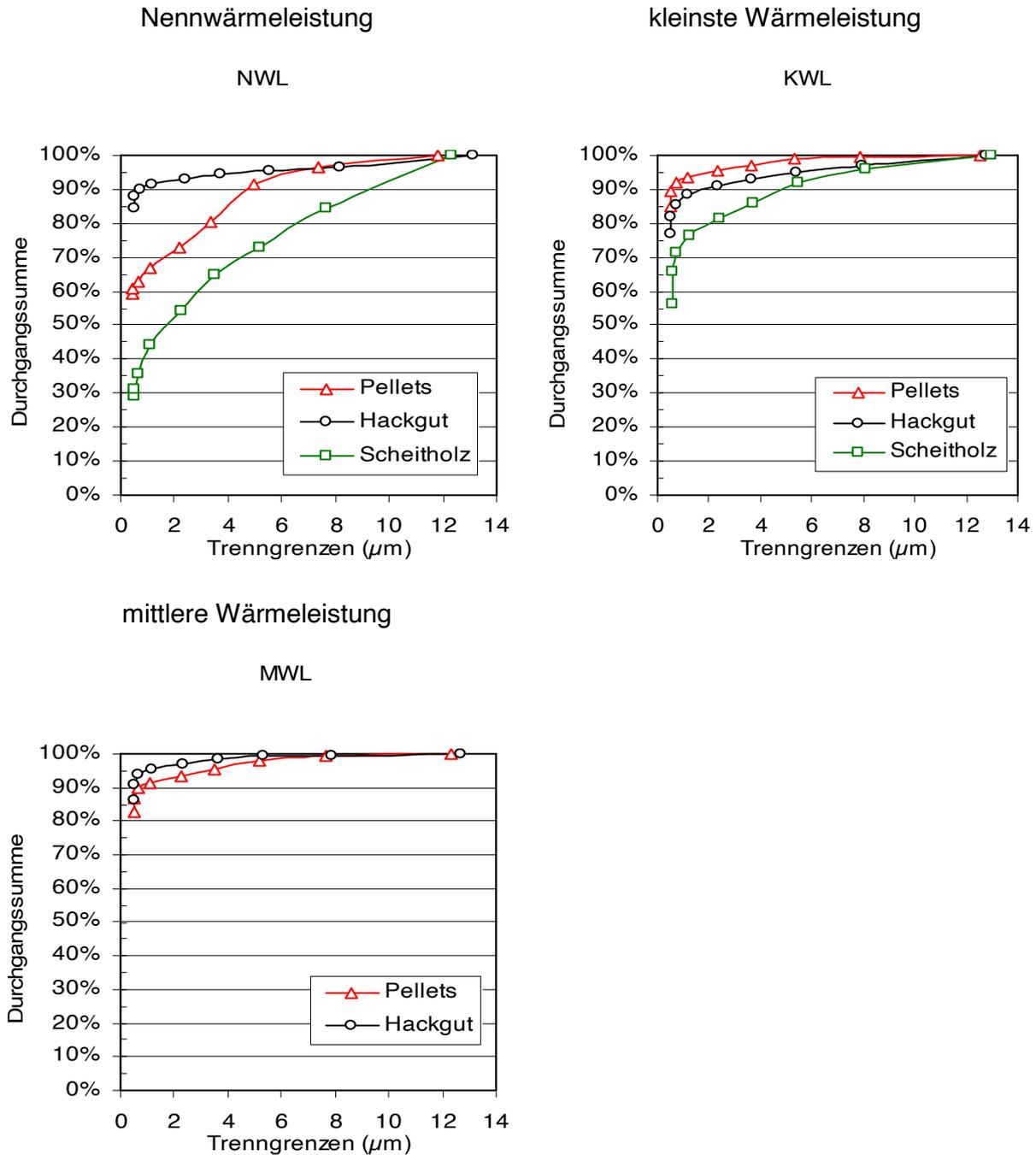


Abbildung 13: Verteilungssummenkurven der gemessenen Partikelkollektive bei den drei Holzfeuerungen moderner Bauart. NWL Nennwärmeleistung (Scheitholzessel: 30 kW, Hackgutessel: 50 kW, Pelletessel: 15 kW), MWL mittlere Wärmeleistung (hier: 33 bzw. 10 kW), KWL kleinste Wärmeleistung (hier 16, 14 bzw. 5 kW)

Generell verschieben sich die Staubanteile bei abnehmender Wärmeleistung in Richtung kleinerer Korngrößenfraktionen. Besonders deutlich zeigt sich dies beim Scheitholzkessel. Bei den Schüttgutbrennstoffen (vor allem beim Holzhackgut) ist dieser Effekt dagegen geringer, er wird aber gestützt durch frühere Untersuchungen von LAUNHARDT et al. [26], in denen sich die Submikronfraktion ($d_{ae} < 1 \mu\text{m}$) ebenfalls bei einer 50 kW Hackgutfeuerung mit Fichtenholz durch Lastminderung von 100 % auf 30 % in anteilmäßig etwa verdoppelte.

Eine plausible Erklärung für diesen erhöhten Anteil von Feinstpartikeln bei kleineren Leistungsstufen bietet die Tatsache, dass die zugeführte Verbrennungsluftmenge zur Absenkung der Heizlast entsprechend reduziert werden muss. Dadurch sinkt die Strömungsgeschwindigkeit in der Feuerungsanlage ab, was dazu führt, dass gröbere und damit auch trägere Partikel nicht mehr in dem Maße im Abgas mitgerissen werden. Dieser Effekt zeigt sich besonders bei der Scheitholz- und der Pelletfeuerung, die bei kleinster Wärmeleistung einen höheren Anteil an Feinstpartikeln aufweisen (Abbildung 13), während gleichzeitig der Gesamt-Partikelaustritt zurückgeht.

Durchweg ist festzustellen, dass bei allen hier untersuchten Holzbrennstoffen der weitaus größte Teil der Gesamtstaubemission im Feinstaubbereich ($d_{ae} < 10 \mu\text{m}$) vorliegt und dass – mit Ausnahme des Scheitholzkessels bei Nennwärmeleistung – sämtliche Messungen ein Maximum im Submikronbereich ($d_{ae} < 1 \mu\text{m}$) aufweisen (mindestens ca. 60 bis 80 % Anteil). Diese Größenordnung für die Submikronfraktion wird durch Ergebnisse aus Messungen an größeren Biomassefeuerungen belegt, in denen die Submikronpartikel einen mindestens 80 %-igen Anteil hatten [20][21]. Nach früheren Untersuchungen der Landtechnik Weihenstephan kann diese Aussage auch auf biogene Nicht-Holzbrennstoffe wie Stroh, Getreideganzpflanzen oder Landschaftspflegeheu übertragen werden [26]. Bei Verwendung von Holzhackgut sind der gleichen Quelle zufolge insgesamt allerdings auch günstigere Werte, d. h. geringere Submikronpartikelanteile verglichen mit den hier berichteten Werten möglich.

Bei der Interpretation der Korngrößenverteilungsergebnisse darf allerdings nicht übersehen werden, dass es sich lediglich um Relativzahlen, d. h. um Anteile an einer Gesamtpartikelmasse handelt. Da diese Gesamtmasse ihrerseits größeren Schwankungen unterworfen ist (Kapitel 4.1), kann eine umfassende Bewertung der Anlagentypen und Einflussgrößen nur durch Betrachtung der tatsächlichen Partikelmassenemissionen der einzelnen Staubfraktionen sinnvoll erfolgen. Das erfolgt durch Multiplikation der hier dargestellten relativen Massenanteile mit dem jeweiligen in Kapitel 4.1 (Tabelle 11) dargestellten Gesamtstaubemissionswert pro Normkubikmeter.

Diese Ergebnisse solcher Berechnungen sind am Beispiel der untersuchten "modernen Feuerungen" in Abbildung 14 dargestellt. Die Darstellung zeigt, dass die Scheitholzfeuerung trotz der oben genannten geringen Anteile submikroner Teilchen ($< 1 \mu\text{m}$) bei den Gesamtemissionen dieser Größenklasse insgesamt nicht günstiger zu bewerten ist, als die Pelletfeuerung. Dagegen bleiben die Vorteile gegenüber der Hackgutfeuerung auch bei der Betrachtung der Schadstoffkonzentrationen im normierten Abgas bestehen.

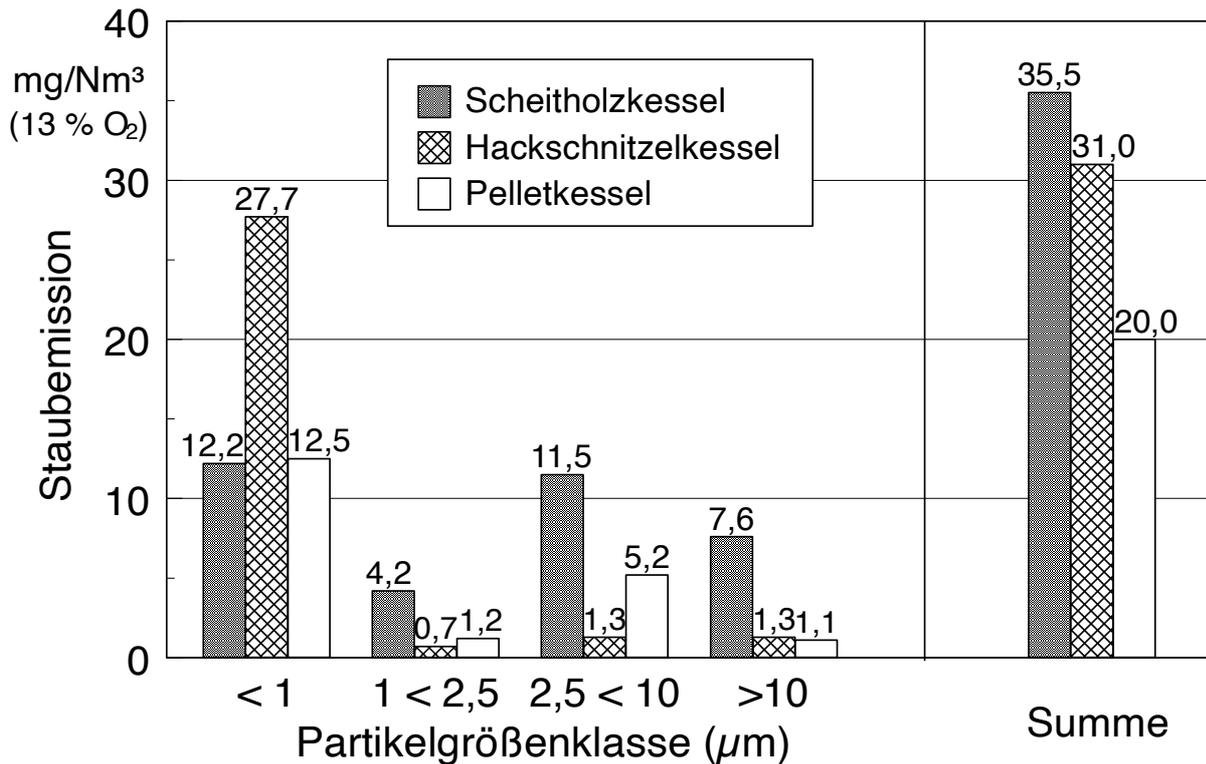


Abbildung 14: Feinstaubemission moderner Holzfeuerungen, unterschieden nach Partikelgrößenklassen. Messungen bei Nennwärmeleistung mit trockenen Brennstoffen ($w < 15\%$)

4.2.2 Entwicklungstand

Deutliche Unterschiede bei den ausgestoßenen Partikelgrößen zeigen sich zwischen den beiden untersuchten technologischen Entwicklungsständen von Scheitholzkesseleln. Während der Altkessel noch ca. 79 % Submikronpartikelanteile ($d_{ae} < 1\ \mu\text{m}$) im Gesamtstaubausstoß aufweist, sinkt dieser Anteil bei der modernen Feuerung auf ca. 35 % ab (Tabelle 12).

Für die absolute Konzentration der Partikelmasse einzelner Korngrößenklassen ist allerdings die ausgestoßene Gesamtstaubmenge entscheidend. Die hohen Submikronpartikelanteile der Feuerung "alte Technik" sind nochmals um ein Vielfaches höher, wenn berücksichtigt wird, dass hier etwa 4-mal (NWL) bzw. 9-mal (KWL) soviel Gesamtstaub emittiert wird, wie bei der "modernen" Scheitholzfeuerungsart. Für die Submikronfraktion ($< 1\ \mu\text{m}$) bedeutet dies einen Partikelausstoß von $149\ \text{mg}/\text{Nm}^3$ bei der "alten Technik" gegenüber $7\ \text{mg}/\text{Nm}^3$ bei der modernen Scheitholzfeuerungsart (bei Nennwärmeleistung). Dies errechnet sich aus dem Korngrößenanteil (Tabelle 12), der mit dem jeweiligen Gesamtstaubausstoß (Tabelle 11) multipliziert wird.

Wie schon bei den unterschiedlichen Feuerungsarten (Kapitel 4.2.1) festgestellt wird, zeigen sich bei dem Scheitholzgebläsekessel ("modern") bei abnehmender Wärmeleistung Verschiebungen in Richtung kleinerer Korngrößenfraktionen (Abbildung 15 bzw. Tabelle 12). Auch hier bietet die Tatsache der reduzierten Verbrennungsluftmenge, die bei abgesenkter Heizlast zu einer reduzierten Abgasgeschwindigkeit führt, einen plausiblen Erklärungsansatz. Für die Scheitholzfeuerungsart

der "alten Technik" wird eine lastabhängige Änderung der Feinstaubanteile nicht beobachtet; auch der Gesamtstaubausstoß unterscheidet sich auf dem festgestellten hohen Niveau kaum noch.

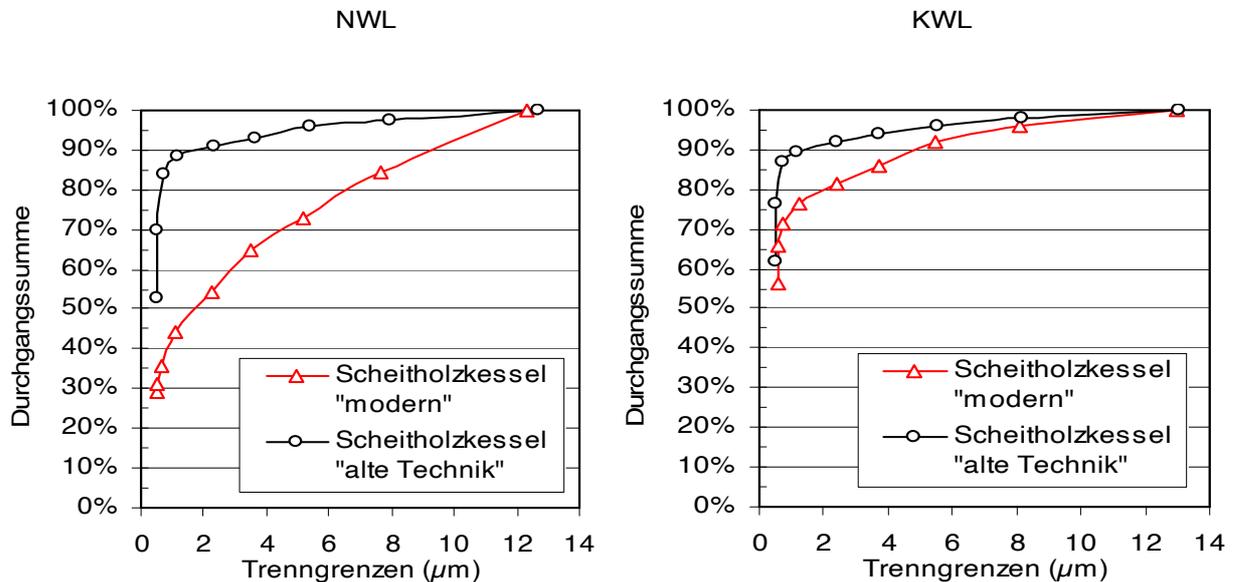


Abbildung 15: Verteilungssummen der gemessenen Partikelkollektive bei den Scheitholzkesselel moderner und alter Bauart. NWL Nennwärmeleistung ("modern": 30 kW, "alte Technik": 33 kW), KWL kleinste Wärmeleistung (hier: 16 bzw. 24 kW)

4.2.3 Brennstoffwassergehalt

Die unterschiedlichen Wassergehalte, die hier lediglich bei der Hackgutfeuerung abgestuft untersucht wurden, verursachen nur sehr geringe Veränderungen bei der Korngrößenverteilung im Staubaustoß. Lediglich bei Nennwärmeleistung ist eine Verbesserung der Staubqualität beim höheren Wassergehalt festzustellen; der Submikronpartikelgehalt sinkt hier von ca. 89 auf 65 %. Dieser Abfall muss allerdings vorsichtig interpretiert werden, da in beiden Wiederholungsmessungen jeweils unverbrannte Brennstoffteilchen (Holzstaub) im Grobabscheidebereich des Impaktors festgestellt worden war; diese nicht in der Verbrennung gebildeten Grobstaubpartikel führten zu einer Höhergewichtung dieser Korngrößenklasse.

Bei den beiden übrigen Wärmeleistungsstufen war hingegen kein Einfluss des Wassergehaltes erkennbar. Das lässt darauf schließen, dass bei steigender Brennstofffeuchte nicht mit Nachteilen sondern tendenziell eher mit Vorteilen beim Gehalt der Feinstpartikel im Abgas zu rechnen ist, zumal sich auch der Gesamtpartikelausstoß eher günstiger entwickelt (vgl. Kapitel 4.1.3). Diese Aussage gilt allerdings nur unter dem Vorbehalt, dass der erhöhte Wassergehalt nicht zu einer drastisch verminderten Verbrennungsqualität mit entsprechend erhöhter Gesamtstaubbelastung durch Partikeln aus unverbrannten Rauchgasbestandteilen (z. B. Ruß, Teere) führt. Ein derartiger wassergehaltsbedingter Anstieg der CO- und Gesamtstaubemissionen geht dann oft mit höheren Anteilen größerer Staubpartikel einher; das wurde beispielsweise bei LAUNHARDT et al. [26] beobachtet. Die Höhergewichtung der Grobstaubpartikel kann in diesem Fall auf das vermehrte Auf-

treten unverbrannter Brennstoffbestandteile (Holzkohle) mit relativ großen aerodynamischen Durchmessern zwischen $5\ \mu\text{m}$ und $100\ \mu\text{m}$ [19] zurückgeführt werden.

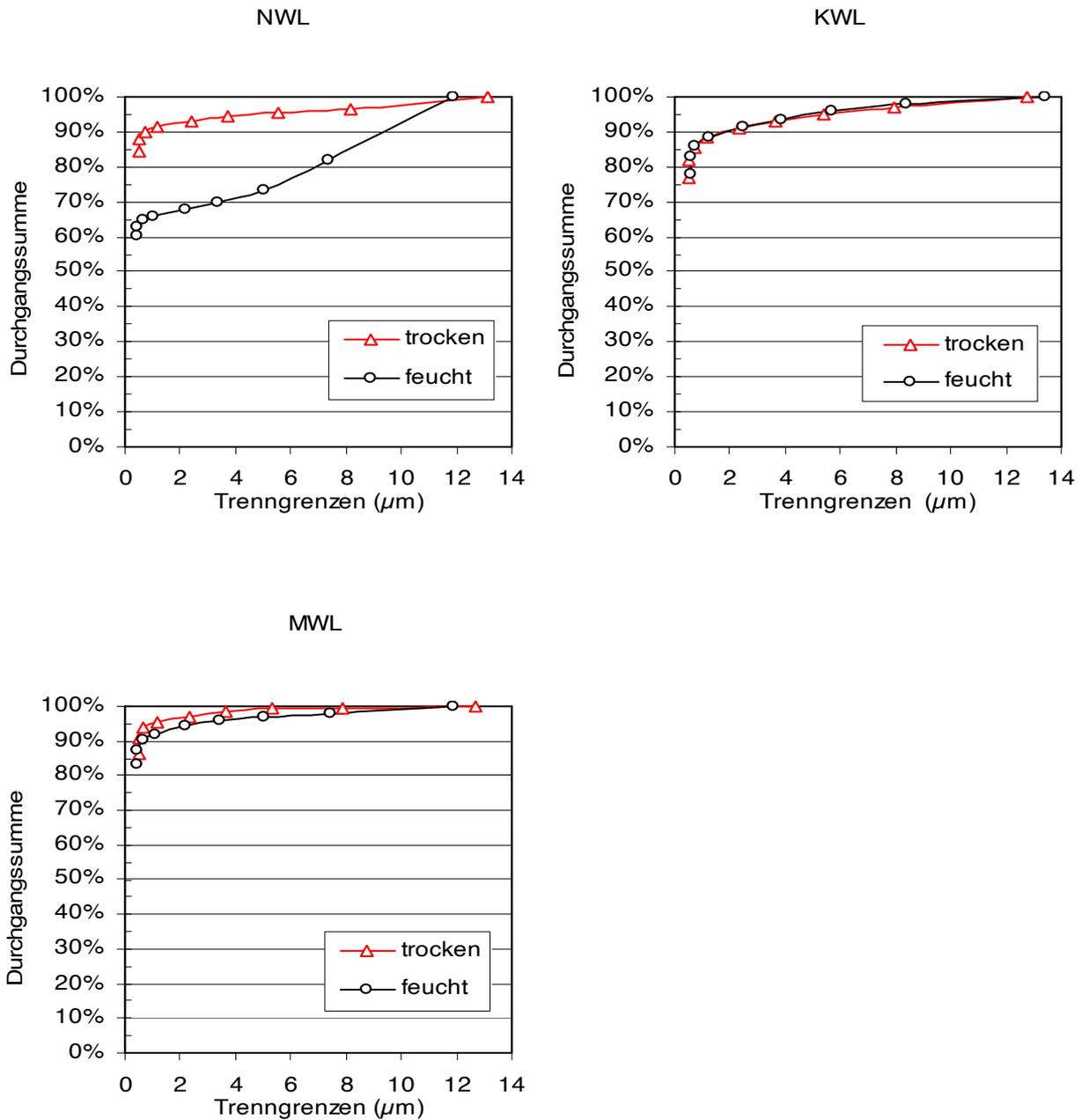


Abbildung 16: Verteilungssummen der gemessenen Partikelkollektive bei unterschiedlichen Brennstoffwassergehalten in der untersuchten Hackgutfeuerung. NWL Nennwärmeleistung (50 kW), MWL mittlere Wärmeleistung (hier: 33 bzw. 31 kW), KWL kleinste Wärmeleistung (hier: 13 bzw. 14 kW)

5 Zusammenfassung

Staubemissionen aus Verbrennungsprozessen sind aufgrund der Tatsache, dass sie auf ihrer Oberfläche adsorbierte unverbrannte Kohlenwasserstoffe oder Schwermetalle mit sich führen können, besonders kritisch. Besondere Aufmerksamkeit gilt hierbei dem Feinstaub mit einem aerodynamischen Durchmesser (d_{ac}) von weniger als $10 \mu\text{m}$ sowie den submikronen Teilchen mit weniger als etwa $1 \mu\text{m}$ aerodynamischen Durchmesser. Letztere werden aufgrund des hohen Abscheidegrads im Lungentrakt auch als lungengängig bezeichnet. Holzfeuerungen tragen – wie alle anderen Feuerungen – ebenfalls zu solchen gesundheitlichen Belastungen bei, zumal die Gesamtstaubemissionen aufgrund des Aschegehaltes im Brennstoff relativ hoch sein können.

Um die teilweise lückenhaften Kenntnisse über die Korngrößenverteilungen bei den Flugstäuben aus Holzfeuerungen kleinerer Leistung zu schließen, wurde eine Serie von Messungen an zwei Scheitholzkesseln ("alte" und "moderne" Technik mit 33 bzw. 30 kW Nennwärmeleistung) sowie an einem 50-kW-Hackschnitzkessel und einem 15-kW-Pelletkessel durchgeführt. Neben den "klassischen" Emissionsgrößen Kohlenmonoxid, VOC, Gesamt-Staub und NO_x wurden die Verteilungen der ausgestoßenen Flugstäube mit Hilfe eines Kaskadenimpaktors bestimmt. Die Messungen fanden bei Nennwärmeleistung (NWL) sowie bei kleinster Wärmeleistung (KWL) statt; bei den automatisch beschickten Feuerungen wurde außerdem noch eine mittlere Laststufe (MWL) untersucht. Der Wassergehalt im Brennstoff wurde lediglich bei der Hackgutfeuerung in zwei Abstufungen variiert.

Bei der "modernen" Scheitholzfeuerung, der Hackschnitzelfeuerung und vor allem bei der Pelletfeuerung wurden bei Nennwärmeleistung durchweg hohe Verbrennungsqualitäten erzielt, abzulesen an den CO-Emissionen, die meist unter 200 mg/Nm^3 lagen. Sehr kleine Heizlaststufen von nur 30 bzw. 50 % der Nennwärmeleistung führten zu Nachteilen bei der Scheitholz- und Hackgutfeuerung; diese Nachteile wurden jedoch nur bei den CO-Emissionen sichtbar, während sich der Gesamt-Staubausstoß fast durchweg günstiger entwickelte.

Der Gesamt-Staubausstoß lag bei den "modernen" Anlagen mit Werten um oder unter 30 mg/Nm^3 ebenfalls auf einem relativ niedrigen Niveau; an den drastisch höheren Emissionswerten für die Scheitholzfeuerung der "alten Technik" lässt sich jedoch die Wirkung der zurückliegenden technologischen Entwicklung solcher Scheitholzkessel ablesen. Durch die bei der "alten Technik" fehlende räumliche Trennung von Entgasungszone und heißer Nachverbrennung, die Anbringung von Wärmetauscherflächen im Feuerraum sowie durch das Fehlen eines Zuluftgebläses mit entsprechender mikroprozessorgesteuerten Regelung liegen die Gesamtstaub-Emissionen beim Altkessel mit etwa dem 4-fachen (NWL) bzw. dem 9-fachen (KWL) deutlich über denen des modernen Scheitholzkessels.

Durchweg ist festzustellen, dass bei allen hier untersuchten Holzbrennstoffen der weitaus größte Teil der Gesamtstaubemission im Feinstaubbereich, d. h. bei aerodynamischen Durchmessern (d_{ac}) von weniger als $10 \mu\text{m}$ vorliegt und dass – mit Ausnahme des Scheitholzkessels bei Nennwärmeleistung – sämtliche Messungen ein Maximum im Submikronbereich ($d_{ac} < 1 \mu\text{m}$) aufweisen. Beim Einsatz von Scheitholz (im "modernen" Heizkessel) ist der Anteil sehr feiner Stäube

deutlich geringer als bei den Schüttgutbrennstoffen Hackschnitzel und Pellets; beispielsweise tragen die Submikronteilchen (PM_{10}) im Nennwärmelastzustand nur etwa 35 % zur Gesamt-Partikelmasse bei, während bei vergleichbaren Heizlaststufen eines Pellet- bzw. Hackschnitzelkessels zwischen 62 und 89 % auf diese Korngrößenklasse entfallen.

In der Regel verschieben sich die Feinststaubanteile bei abnehmender Wärmeleistung in Richtung kleinerer Korngrößenfraktionen, so dass die PM_{10} -Werte, d. h. die Partikelanteile (Particulate Matter) mit Korndurchmessern unter $1 \mu m$, im Teillastbetriebszustand stets über 69 % (Scheitholzessel) 84 % (Hackschnitzelkessel) bzw. 89 % (Pelletkessel) liegen. Solche Verschiebungen zeigen sich jedoch kaum noch beim Scheitholzessel der "alten Technik"; auch der Gesamtstaubausstoß unterscheidet sich auf dem festgestellten hohen Niveau kaum noch.

Generell ist die lastabhängige Verschiebung hin zu den kleineren Korngrößen bei allen Feuerungen auch nur dann besonders ausgeprägt, wenn sich die Verbrennungsqualität gleichzeitig mit der Heizlast deutlich verringert (z. B. gemessen am CO-Ausstoß). Analog dazu kommt es auch bei Verwendung von feuchterem Brennstoff nicht zu höheren Submikronstaubanteilen, da sich die Verbrennungsqualität in der verwendeten Hackschnitzelfeuerung – zumindest bei mittlerer Leistung und bei Nennwärmeleistung – nicht verschlechterte.

6 Quellenverzeichnis

- [1] Anonymus: Gebrauchsanleitung für Kaskadenimpaktor Anderson 2000 Inc. Mark III. Hrsg.: Klaus Schäfer Gesellschaft für Verfahrenstechnik mbH. Lange: Selbstverlag 1979, 50 S.
- [2] Anonymus: Gebrauchsanleitung für Präzisions-Kaskadenimpaktor Typ PI 1. Hrsg.: Retsch GmbH & Co KG. Haan: Selbstverlag, 1984, 16 S.
- [3] Anonymus: Untersuchungsbericht zur Weihenstephaner Feuerungsprüfung am Stückholzkessel Hoval PuroLyt 25. Hrsg.: Landtechnischer Verein in Bayern e.V.. Freising: Selbstverlag 1998, 12 S. (Reihe „Landtechnik Feuerungsprüfungen“, Heft 1)
- [4] Anonymus: MAK- und BAT-Werte-Liste 1996 – Maximale Arbeitsplatzkonzentrationen und Biologische Arbeitsstofftoleranzwerte. Hrsg.: Deutsche Forschungsgemeinschaft. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft mbH, 1996, 188 S., Schriftenreihe „Mitteilung der Deutschen Forschungsgemeinschaft“, Nr. 32
- [5] Boubel, R.W.; Fox, D.L.; Tuner, D.B.: Fundamentals of Air Pollution, Academic Press, San Diego (USA), 1994
- [6] DIN EN 303-5, Teil 5: Heizkessel für feste Brennstoffe, hand- und automatisch beschickte Feuerungen, Nenn-Wärmeleistungen bis 300 kW. Begriffe, Anforderungen, Prüfungen und Kennzeichnung. Deutsches Institut für Normung. Berlin: Beuth Verlag 1999; 28 S.
- [7] DIN 4702, Teil 2 (03/1990): Heizkessel – Regeln für die heiztechnische Prüfung. Hrsg.: Deutsches Institut für Normung. Berlin: Beuth Verlag
- [8] DIN 51 731: Prüfung fester Brennstoffe – Presslinge aus naturbelassenem Holz – Anforderungen und Prüfung. Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin, 1996.
- [9] DIN 4702, Teil 1 Entwurf (01/1993): Heizkessel - Begriffe, Anforderungen, Prüfung, Kennzeichnung. Hrsg.: Deutsches Institut für Normung. Berlin: Beuth Verlag
- [10] DIN 4702, Teil 2 (03/1990): Heizkessel - Regeln für die heiztechnische Prüfung. Hrsg.: Deutsches Institut für Normung. Berlin: Beuth Verlag
- [11] DIN 51 718 (01/1978): Feste Brennstoffe - Bestimmung des Wassergehaltes. Hrsg.: Deutsches Institut für Normung. Berlin: Beuth Verlag
- [12] DIN 51 900, Teil 3 (08/1977): Prüfung fester und flüssiger Brennstoffe - Bestimmung des Brennwertes mit dem Bomben-Kalorimeter und Berechnung des Heizwertes - Verfahren mit adiabatischem Mantel. Hrsg.: Deutsches Institut für Normung. Berlin: Beuth Verlag
- [13] DIN 66 141 (02/1974): Darstellung von Korn-(Teilchen-)größenverteilungen - Grundlagen. Hrsg.: Deutsches Institut für Normung. Berlin: Beuth Verlag
- [14] Dreiseidler, A.; Struschka, M.; Straub, D.; Baumbach, G.: Vergleichsmessungen mit Kaskadenimpaktoren - Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD) der Universität Stuttgart, Bericht Nr. 45-2001, Stuttgart, Selbstverlag, 2001; 52 S.
- [15] Feldhaus, G. Hansel, H.D. (Bearb.): Bundes-Immissionsschutzgesetz. 11. Auflage. Heidelberg, C.F. Müller Verlag, 1997, 646 S.

- [16] Hartmann, H.; Böhm, T.: Bestimmung des Wassergehaltes und der physikalisch-mechanischen Brennstoffeigenschaften. In: Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe (Hrsg.): Eigenschaften biogener Festbrennstoffe – Bestimmung Beeinflussung und Standardisierung. Internationale Tagung, 7.-8. Nov. 2000 Stuttgart, Tagungsband (in Druck)
- [17] Hartmann, H.; Launhardt, T.; Schmid, H.: Combination of Wood Fuel and Natural Gas in Domestic Heating Systems. In: "Biomass for Energy and Industry", Proceedings of the 10th European Conference and Technology Exhibition, 8-11 June 1998 in Würzburg, Published by C.A.R.M.E.N in Würzburg-Rimpar, Germany 1998, S. 1304-1307
- [18] Hartmann, H.; Böhm, T.; Maier, L.: Naturbelassene biogene Festbrennstoffe – Umweltrelevante Eigenschaften und Einflussmöglichkeiten. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (Hrsg.), München, 2000, Reihe "Materialien", Nr. 154
- [19] Hasler, P.; Nussbaumer, T.: Partikelgrößenverteilung bei der Verbrennung und Vergasung von Biomasse. Hrsg.: Bundesamt für Energiewirtschaft. Bern/Schweiz: Selbstverlag, 1997, 54 S.
- [20] Hasler, P.; Nussbaumer, T.: Partikelgrößenverteilung bei der Verbrennung und Vergasung von Biomasse, Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern 1997
- [21] Hasler, P.; Nussbaumer, T.: Particle Size Distribution of the Fly Ash from Biomass Combustion. In: Kopetz, H. u. a. (Hrsg.): Biomass for Energy and Industry; C.A.R.M.E.N., Würzburg-Rimpar, 1998, S. 1330-1333
- [22] Hasler, P.; Nussbaumer, T.: Aerosole aus Biomassefeuerungen: Grundlagen, Eigenschaften und Abscheidung; 5. Holzenergie-Symposium 1998, Bundesamt für Energie, Bern, 1998, S. 45-74
- [23] Kamens, R.M.; Rives, G.D.; Perry, J.M.; Bell, D.A.; Paylor, R.F. Jr.; Goodman, R.G.; Claxton, L.D.: Mutagenic Changes in Dilute Wood Smoke as It Ages and Reacts with Ozone and Nitrogenic Dioxide: An Outdoor Chamber Study. Environmental Science & Technology, 1984, Vol. 18, No. 7, S. 523-530
- [24] Kicherer, A.: Biomasseverbrennung in Staubfeuerungen - Technische Möglichkeiten und Schadstoffemissionen. Band 6. Hrsg: Verein Deutscher Ingenieure. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1996, 174 S., Schriftenreihe „VDI Fortschrittberichte“, Nr. 344
- [25] Krebs, R.: Staubbeladungsmessungen in strömenden Gasen. Hrsg.: Lurgi Umwelt- und Chemietechnik GmbH. Frankfurt am Main: Selbstverlag, 1978, 86 S.
- [26] Launhardt, T.; Hartmann, H.; Link, H.; Schmid, V.: Verbrennungsversuche mit naturbelassenen biogenen Festbrennstoffen in einer Kleinfeuerungsanlage – Emissionen und Aschequalität. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (Hrsg.), München, 2000, Reihe "Materialien", Nr. 156, 133 S.
- [27] Launhardt, T.; Hurm, R.; Schmid, V. Link, H.: Dioxin- und PAK-Konzentrationen in Abgas und Aschen von Stückholzfeuerungen. Hrsg: Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen. München: Selbstverlag 1998, 149 S. Schriftenreihe „StMLU-Materialien“ Nr. 142
- [28] Lewis, C.W.; Baumgardner, R.E.; Stevens, R.K.; Claxton, L.D.; Lewtas, J.: Contribution of Woodsmoke and Motor Vehicle Emissions to Ambient Aerosol Mutagenicity. Environmental Science & Technology, 1988, Vol. 22, No. 8, S. 968-971

- [29] Nussbaumer, T.: Direkte Thermische Umwandlung (Verbrennung) – Grundlagen. In: Kaltschmitt, M.; Hartmann, H. (Hrsg.): Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren. Springer Verlag, Berlin – Heidelberg – New York, 2001, S. 287-319
- [30] Nussbaumer, T.: Schadstoffbildung bei der Verbrennung von Holz. Dissertation. Hrsg.: Laboratorium für Energiesysteme, ETH Zürich. Zürich 1989: Juris Druck + Verlag, 193 S.; Schriftenreihe „Forschungsberichte“, Nr. 6
- [31] Oberhauser, K.; Kanak, M.; Hartmann, H.: Vergleich der Emissionen bei der Verbrennung von Getreideganzpflanzen an einer Praxisanlage in Abhängigkeit von der Brennstoffaufbereitung. Abschlussbericht für das Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. Bayerische Landesanstalt für Landtechnik, TU München-Weihenstephan, Freising, Selbstverlag, 1998, 24 S.
- [32] ÖNORM M7135: Preßlinge aus naturbelassenem Holz und naturbelassener Rinde - Pellets und Briketts, Anforderungen und Prüfbestimmungen. Österreichisches Normungsinstitut (ON) (Hrsg.), Wien, Österreich, Selbstverlag, 1998; 4 S.
- [33] Peschel, E.: Untersuchungen zur Partikelemission bei der Verbrennung von biogenen Festbrennstoffen in einer Kleinf Feuerungsanlage. Diplomarbeit. Institut für Landtechnik, Technische Universität München, Freising, 1997, 58 S.
- [34] Schenk, S.: Aufbau einer Messeinrichtung zur fraktionierenden Staubmessung im Abgas von Biomassefeuerungen. Semesterarbeit. Institut für Landtechnik, Technische Universität München, Freising, 1996, 48 S.
- [35] Siegmann, K. und Siegmann, H.C.: Molekulare Vorstudien des Rußes und das Gesundheitsrisiko für den Menschen, Phys. Bl., 54 (1998) Nr. 2, S. 149-152
- [36] Ramdahl, T.; Alfheim, I.; Rustad, S.; Olsen, T.: Chemical and Biological Characterization of Emissions from Small Residential Stoves Burning Wood and Charcoal, Chemosphere, 1982, Vol. 11, 601-611
- [37] Siegmann, K. und Siegmann, H.C.: Molekulare Vorstudien des Rußes und das Gesundheitsrisiko für den Menschen, Phys. Bl., 54 (1998) Nr. 2, S. 149-152
- [38] VDI 2066, Blatt 1 (10/1975): Messen von Partikeln – Staubmessungen in strömenden Gasen – Gravimetrische Bestimmung der Staubbiladung – Übersicht. Hrsg.: Verein Deutscher Ingenieure. Berlin: Beuth Verlag
- [39] VDI 2066 Blatt 5 Entwurf (11/1987): Messen von Partikeln - Staubmessung in strömenden Gasen - Fraktionierende Staubmessung nach dem Impaktionsverfahren - Kaskadenimpaktor. Hrsg.: Verein Deutscher Ingenieure. Berlin: Beuth Verlag
- [40] VDI 2066, Blatt 1 (10/1975): Messen von Partikeln - Staubmessungen in strömenden Gasen - Gravimetrische Bestimmung der Staubbiladung - Übersicht. Hrsg.: Verein Deutscher Ingenieure. Berlin: Beuth Verlag
- [41] VDI 2066, Blatt 3 Entwurf (04/1986): Messen von Partikeln - Manuelle Staubmessung in strömenden Gasen - Gravimetrische Bestimmung geringer Staubgehalte. Hrsg.: Verein Deutscher Ingenieure. Berlin: Beuth Verlag
- [42] VDI 3480, Blatt 1 (07/1984): Messen gasförmiger Emissionen - Messen von Chlorwasserstoff - Messen der Chlorwasserstoff-Konzentration von Abgas mit geringem Gehalt an chloridhaltigen Partikeln. Hrsg.: Verein Deutscher Ingenieure. Berlin: Beuth Verlag

- [43] VDI 3481, Blatt 1 (08/1975): Messung gasförmiger Emissionen - Messen der Kohlenwasserstoff-Konzentration - Flammen-Ionisations-Detektor (FID). Hrsg.: Verein Deutscher Ingenieure. Berlin: Beuth Verlag
- [44] VDI 3499, Blatt 2 Entwurf (03/1993): Messen von Emissionen - Messen von polychlorierten Dibenzo-*p*-dioxinen (PCDD) und Dibenzofuranen (PCDF) - Filter/Kühler-Methode. Hrsg.: Verein Deutscher Ingenieure. Berlin: Beuth Verlag
- [45] Vetter, A. et al.: Untersuchungen zum Einfluss der Brennstoffart und -qualität auf die Zusammensetzung der Reststoffe und deren Verwertung am Strohheizwerk Schkölen zur Sicherung der Umweltverträglichkeit. Abschlussbericht für Deutsche Bundesstiftung Umwelt. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Jena, 1995, 54 S.
- [46] Weber, R.; Moxter, W.; Pilz, M.; Pospischil, H.; Roleder, G.: Untersuchungen zum Einfluss der biogenen Brennstoffe und -qualität sowie der Fahrweise der Anlage auf die gas- und partikelförmigen Emissionen des Strohheizkraftwerkes Schkölen zur Bewertung der Umweltverträglichkeit. Abschlussbericht für Deutsche Bundesstiftung Umwelt. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Jena, 1995, 54 S.

Berichte im Rahmen dieser Schriftenreihe

Berichte aus dem TFZ:

1	Qualitätssicherung bei der dezentralen Pflanzenölerzeugung für den Nicht-Nahrungsbereich Projektphase 1: Erhebung der Ölqualität und Umfrage in der Praxis
2	Erprobung der Brennwerttechnik bei häuslichen Holzhackschnitzelheizungen mit Sekundärwärmetauscher
3	Daten und Fakten zur dezentralen Ölgewinnung in Deutschland
4	Untersuchungen zum Feinstaubausstoß von Holzzentralheizungsanlagen kleiner Leistung

