

# **Luftreinhalung, Haus-Systeme und Stromerzeugung**

---

Tagungsband zum 6. Holzenergie-Symposium  
20. Oktober 2000  
ETH Zürich

**Thomas Nussbaumer (Hrsg.)**

Bezugsquelle

ENET  
Egnacherstrasse 69  
CH – 9320 Arbon  
Telefon 071 440 02 55  
Fax 071 440 02 56  
Email enet@temas.ch

# Inhaltsverzeichnis

	Vorwort	7
1	Ulrich Jansen: Bedeutung der Partikel- und Stickoxidemissionen aus Holzfeuerungen und Massnahmen zur Luftreinhaltung	9
2	Christian Gaegauf: Partikelemissionen verschiedener Holzfeuerungen	31
3	M. Oser, Th. Nussbaumer, B. Schweizer, M. Mohr und R. Figi: Untersuchung der Einflüsse auf die Partikelemissionen in einer Unterschubfeuerung	51
4	Philipp Hasler, Thomas Nussbaumer und Andres Jenni: Praxiserhebung über Stickoxidemissionen automatischer Holzfeuerungen	69
5	Roger Salzmänn und Thomas Nussbaumer: Brennstoffstufung zur Stickoxidminderung in einer Unterschubfeuerung	91
6	Heinrich Huber: Kombination von kontrollierter Lüftung und Speicheröfen im Minergie-Wohnhaus	109
7	Christian Völlmin: Stand und Entwicklungstendenzen von Pelletfeuerungen in Öfen und Kesseln	125
8	Michael Wagner: Einsatz von Holzgas in Verbrennungsmotoren	143
9	Philipp Morf, Philipp Hasler und Thomas Nussbaumer: Teerbildung und -konversion bei der Holzvergasung	159
10	Henrik Carlsen: Stirling engine for automatic wood furnaces	177
11	Rob Remmers: 25 MW-Holzwerk mit stationärer Wirbelschichtfeuerung in Cuijk (NL)	187
12	Samuel Stucki und Serge Biollaz: Wasserstoffherstellung aus Energieholz	197
13	Hans-Ulrich Schärer: Konsequenzen der Abstimmung über Energievorlagen in der Schweiz	211
	Autorenverzeichnis	215

# Untersuchung der Einflüsse auf die Partikelemissionen in einer Unterschubfeuerung

---

M. Oser<sup>1</sup>, Th. Nussbaumer<sup>1</sup>, B. Schweizer<sup>2</sup>, M. Mohr<sup>3</sup>, R. Figi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Verenum, Zürich, <sup>2</sup>Tiba-Müller AG, Balsthal, <sup>3</sup>EMPA, Dübendorf

## Zusammenfassung

Holzfeuerungen belasten die Umwelt hauptsächlich aufgrund der Stickoxid- und Partikelemissionen. Für die Umweltrelevanz der Partikel sind neben der Gesamtfracht deren Korngrösse und Zusammensetzung entscheidend, bei der Grösse insbesondere, ob die Partikel lungengängig sind.

Ziel des vorliegenden Projekts ist aufzuzeigen, welche Mechanismen für die Partikelbildung verantwortlich sind und wie die Partikelemissionen durch die Betriebsparameter in einer automatischen Holzfeuerung beeinflusst werden. Dazu wurde eine Versuchsanlage mit einer 120 kW Unterschubfeuerung realisiert, die eine weitgehend unabhängige Variation der Betriebsparameter Luftüberschuss, Temperatur, Gasgeschwindigkeit, Abgasrezirkulation und Brennstoffeigenschaften (Typ, Feinanteil und Wassergehalt) ermöglicht. Bei den verschiedenen Betriebsbedingungen werden die Abgaszusammensetzung, die Partikelgrössenverteilung sowie die chemisch-physikalische Zusammensetzung der Partikel untersucht.

Erste Versuche mit Buchenholzschnitzeln zeigen, dass die Partikel bei guten Verbrennungsbedingungen hauptsächlich aus Salzen bestehen und einen Kohlenstoffgehalt von etwa 7 Gew.-% aufweisen. Der Anteil an organischem Kohlenstoff liegt lediglich bei etwa 1 Gew.-%, was bedeutet, dass nur ein äusserst geringer Anteil der Partikel direkt auf eine unvollständige Verbrennung zurückzuführen sind. Aus der Elementaranalyse der Partikel geht hervor, dass Kalium mit einem Anteil von über 30 Gew.-% neben Sauerstoff das wichtigste Element ist. In den salzförmigen Verbindungen liegen Kaliumsulfat,  $\alpha$ -Kaliumsulfat und Kaliumchlorid sowie allenfalls weitere Kaliumverbindungen mit geringerer Molmasse vor.

Die Bestimmung der Korngrösse mittels Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS) zeigt, dass die Partikel eine monomodale Anzahlverteilung mit einem Maximum zwischen 60 nm und 80 nm aufweisen. Die Massenverteilung ist dagegen bimodal mit einem zweiten Maximum bei etwa 10  $\mu$ m, wobei die submikrone Partikelfraktion von etwa drei Viertel der Masse ausmacht. Für zukünftige Emissionsminderungen sind diese submikronen Partikel von vordringlicher Bedeutung, da sie wegen ihrer Lungengängigkeit und der langen Aufenthaltsdauer in der Atmosphäre umweltrelevant sind und in Trägheitsentstaubern nicht abgeschieden werden.

In den bisherigen Messungen wurden die Betriebsparameter bei Verbrennung von Buchenholzschnitzeln mit einem Sekundärluftanteil von rund 35% und bei guter Ausbrandqualität wie folgt variiert:

- Feinanteil kleiner 3 µm zwischen 1,3 Gew.-% und 27,6 Gew.-%
- Luftüberschusszahl zwischen 1,3 und 3,0  
mit Flammtemperaturen von 640°C bis 1020°C.

Aus der Variation des Feinanteils resultierte keine messbare Beeinflussung von Staubgehalt, Anzahl Partikel und Korngrößenverteilung. Der Luftüberschuss führte dagegen bei tiefen Werten zu einer höheren Partikelmassenkonzentration und bei sehr hohen Werten zu einer grösseren Partikelanzahl.

Die Variation in den genannten Bereichen führte zu einer Beeinflussung des Gesamtstaubgehalts und der Anzahl submikroner Partikel um lediglich rund einen Faktor 1,6 (zwischen 85 mg/Nm<sup>3</sup> und 135 mg/Nm<sup>3</sup> bzw. zwischen 8,4 · 10<sup>7</sup>/Ncm<sup>3</sup> und 13,8 · 10<sup>7</sup>/Ncm<sup>3</sup> bei 13 Vol.-% O<sub>2</sub>). Die Korngrößenverteilung der submikronen Partikel wurde durch diese Variation nicht signifikant beeinflusst.

Die Variation weiterer Parameter ist Gegenstand der laufenden Untersuchungen.

## 1 Einleitung

### 1.1 Ausgangslage

Epidemiologische Studien zeigen, dass Lungenkrankheiten und Sterblichkeit in der Bevölkerung mit der Partikelkonzentration in der Umgebungsluft und ganz besonders mit den submikronen Partikeln korrelieren (z.B. [Dockery et al. 1993]). Die submikronen Partikel stammen zu einem grossen Teil aus Verbrennungsprozessen. Dies ist ein Grund dafür, dass die Feinstäube von zunehmendem Interesse für die Anstrengungen der Luftreinhaltung sind.

Partikel aus Holzfeuerungen setzen sich aus anorganischen Bestandteilen und unverbrannten Kohlenstoffverbindungen zusammen. Die anorganischen Verbindungen führen zu Partikel im submikronen Bereich, die bei einem vollständigen Ausbrand in der Brennkammer frei sind von organischen Substanzen. Bei unvollständiger Verbrennung können zusätzlich relevante Mengen an organischen Verbindungen im Abgas auftreten, die insbesondere auch an die Oberfläche der submikronen Partikel angelagert werden. Abgaspartikel von Holzfeuerungen können so auch zu lungengängigen Trägern kanzerogener Substanzen werden.

Nebst submikronen können auch grössere Partikel mit Durchmessern bis zu mehreren Mikrometern emittiert werden. Diese Partikel weisen in der Regel einen hohen Kohlenstoffgehalt auf und sind somit auf eine unvollständige Verbrennung zurückzuführen.

Die Gesundheitsrelevanz von luftgetragenen Partikeln ist abhängig von der Grösse, der chemischen Zusammensetzung und der Morphologie. In Tabelle 1 sind die ver-

schiedenen Partikeltypen aus der Verbrennung von Holz nach deren Bildung und Zusammensetzung dargestellt.

Tabelle 1 Partikeltypen aus der Verbrennung von Holz, eingeteilt nach deren Bildung und chemischen Zusammensetzung.

Partikel, die auch bei vollständiger Verbrennung entstehen	Partikel aus unvollständiger Verbrennung
Mineralische Bestandteile des Holzes	Elementarer Kohlenstoff (Holzkohle)
Fremdteile, die am Holz anhaften (Sand, Erde)	Organischer Kohlenstoff in Form von unverbrannten Holzbestandteilen
Salze (Sulfate, Nitrate, KCl usw.)	Organischer Kohlenstoff in Form von Teer (höherwertig, aus der Pyrolyse)
Metalloxide (z.B. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Organischer Kohlenstoff in Form von Russ (in der Flamme gebildet)

Die Schweizerische Luftreinhalte-Verordnung (LRV) begrenzt die Partikelemissionen von Holzfeuerungen aufgrund der Massenkonzentration (gravimetrisch auf einem Feinfilter abgeschiedener Staub). Von 70 kW bis 1 MW gilt ein Grenzwert von 150 µg/Nm<sup>3</sup> bei 13 Vol.-% O<sub>2</sub>, von 1 MW bis 5 MW von 150 µg/Nm<sup>3</sup> bei 11 Vol.-% O<sub>2</sub> und ab 5 MW von 50 µg/Nm<sup>3</sup> bei 11 Vol.-% O<sub>2</sub>. Gesundheitsrelevante Grössen wie chemische Zusammensetzung oder Grösse der Partikel werden bis dato nicht berücksichtigt.

Bei der Verbrennung naturbelassener Holzbrennstoffe werden diese Grenzwerte in der Regel mit Einsatz von Trägheitsentstaubern, welche vor allem eine Abscheidewirkung für Partikel grösser 2 µm bis 5 µm aufweisen, eingehalten. Holzfeuerungen weisen um ein Vielfaches höhere Partikelemissionen auf als Öl- und Gasfeuerungen: Im Kamin beträgt die Emission an Partikeln für eine automatische Holzfeuerung rund 109 kg/TJ Nutzenergie im Vergleich zu 0,11 kg/TJ für Heizöl und 0,10 kg/TJ für Erdgas [BUWAL 2000]. Die Gesamtemissionen mit Berücksichtigung von Brennstoffbereitstellung, Transport und Anlagenbetrieb betragen rund 117 kg/TJ für Holz, 9,9 kg/TJ für Heizöl und 5,8 kg/TJ für Erdgas.

Bei einem Vergleich der gesamten Umweltauswirkungen tragen vor allem die Partikel- und die Stickoxidemissionen zum Schädigungspotenzial der Holzfeuerungen bei: Nach Methode der ökologischen Knappheit tragen die Partikel 36,5% und die Stickoxide 38,6% zur Umweltbelastung einer automatischen Holzfeuerung bei, während alle anderen Faktoren zusammen knapp 25% ausmachen [BUWAL 2000]. Bei der totalen Umweltbelastung schneidet Holz im Vergleich zu Heizöl besser ab, im Vergleich zu Erdgas aber schlechter (im Verhältnis Erdgas : Holz : Heizöl von 1 : 1,32 :

1,72). Bei einer Bewertung des Bedarfs an nicht erneuerbarer Energie schneidet Holz dagegen um rund einen Faktor 15 besser ab als Heizöl und Erdgas.

Zur Verbesserung der Umweltverträglichkeit von Holzfeuerungen sind somit vor allem die Partikel- und die Stickoxidemissionen zu vermindern. Eine allfällige Notwendigkeit zukünftiger Massnahmen kann sich bei den Partikeln auch daraus ergeben, dass in der Schweiz die Immissionsgrenzwerte für Feinstäube kleiner 10µm (PM10) überschritten sind und auch in anderen europäischen Ländern sowie in den USA Bestrebungen zur Verminderung der Immissionsbelastung an Feinstäuben bestehen.

Bei Minderung von Partikelemissionen ist es sinnvoll, zuerst die primären Massnahmen auszuschöpfen. Die Kenntnis der Bildungsmechanismen von Partikeln bei der Holzverbrennung und der Einflussgrössen auf die Partikelemissionen sollen dazu eine Basis liefern.

## 1.2 Zielsetzung

Die vorliegende Arbeit soll aufzeigen, welche Mechanismen für die Bildung von Abgaspartikeln in automatischen Holzfeuerungen verantwortlich sind und wie die Partikelemissionen durch die Betriebsparameter beeinflusst werden. Dazu werden die Einflüsse der folgenden Parameter experimentell untersucht:

- **Luftüberschuss** in der primären Verbrennungszone sowie in Reduktionszone und Nachbrennkammer (Vergleich zwischen konventionellem Betrieb und Low-NO<sub>x</sub>-Betrieb durch Luftstufung)
- **Temperatur** in Brennstoffbett und Feuerraum
- **Feinanteil im Brennstoff** (Korngrößenverteilung des Brennstoffs)
- **Brennstoffart** (Nadelholz/Laubholz, Rinde/Stammholz, naturbelassenes Holz/Restholz, Aschegehalt durch Fremddanteile wie Sand, welcher in Rindenbrennstoff von Bedeutung ist)
- **Wassergehalt** des Brennstoffs bzw. Wasserdampfgehalt im Brennraum
- **Abgasrezirkulation** (in Brennstoffbett oder Primärluft mit Variation des Anteils)
- **Gasgeschwindigkeit** im Brennstoffbett
- **Höhe des Glutbetts.**

Die erarbeiteten Grundlagen sollen das Verständnis der Partikelbildung vertiefen und als Basis für technische Ansätze zur Partikelminderung dienen.

## 2 Versuchsdurchführung

### 2.1 Versuchsanlage

Zur Untersuchung der oben genannten Einflüsse wurde eine Versuchsanlage konzipiert, bei welcher die verschiedenen Parameter weitgehend unabhängig voneinander variiert werden können. Im Gegensatz zu einer Praxisanlage, bei der zum Beispiel

Luftüberschuss und Feuerraumtemperatur direkt miteinander korreliert sind, werden Massnahmen zur Entkopplung der Parameter notwendig. Dazu sind die Möglichkeiten eines Wärmeentzugs im Brennstoffbett sowie der Primärluftvorwärmung vorgesehen. Zur Untersuchung des Einflusses des Wassergehalts ist zudem eine Wassereindüsung angebracht. Im weiteren wurde eine Vorrichtung konzipiert, die einen Betrieb mit definiertem Feinanteil im Brennstoff ermöglicht.

Die Versuchsanlage verfügt über eine Unterschubfeuerung mit 120 kW Nennleistung. Als Besonderheiten sind eine Abgasrückführung, eine Wasserkühlung des Brennstoffbetts, eine Wassereindüsung in den Brennraum sowie eine Zudosierung von Feinanteil zum Brennstoff angebracht worden (Abbildung 1).

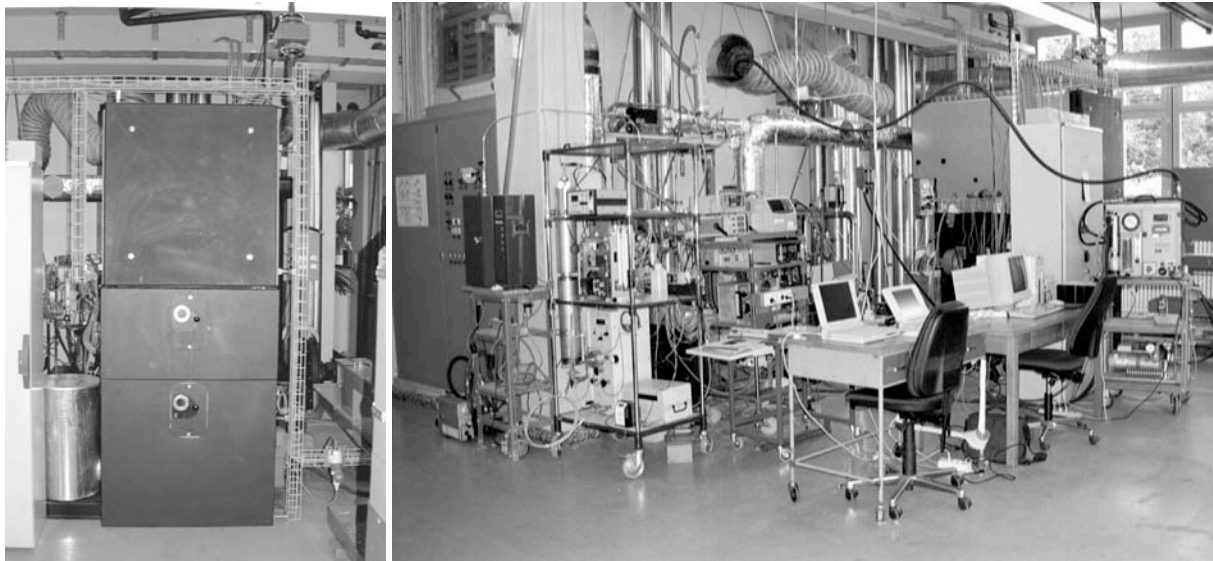


Abbildung 1 Ansicht der Versuchsanlage an der EMPA:  
Links: Automatische Unterschubfeuerung mit einer Nennleistung von 120 kW (Tiba-Müller AG).  
Rechts: Übersicht über die Versuchsanlage mit der Unterschubfeuerung, dem zugehörigen Steuerkasten, dem Abgaskanal, der gesamten Partikelmess-technik (links) und der Datenerfassung.

Die Holzbereitstellung geschieht über Big Bags und einem Brennstoffsilo mit einem Fassungsvermögen von 1,2 Sm<sup>3</sup>. Zur Variation der Brennstoffkorngrosse wurde eine Vorrichtung konzipiert, welche die Aussiebung des Feinanteils und eine definierte Zudosierung des Feinanteils ermöglicht (Abbildung 2). Um die Partikelemissionen aus der Verbrennung zu beurteilen, wurde auf den Einsatz eines Abscheiders verzichtet.

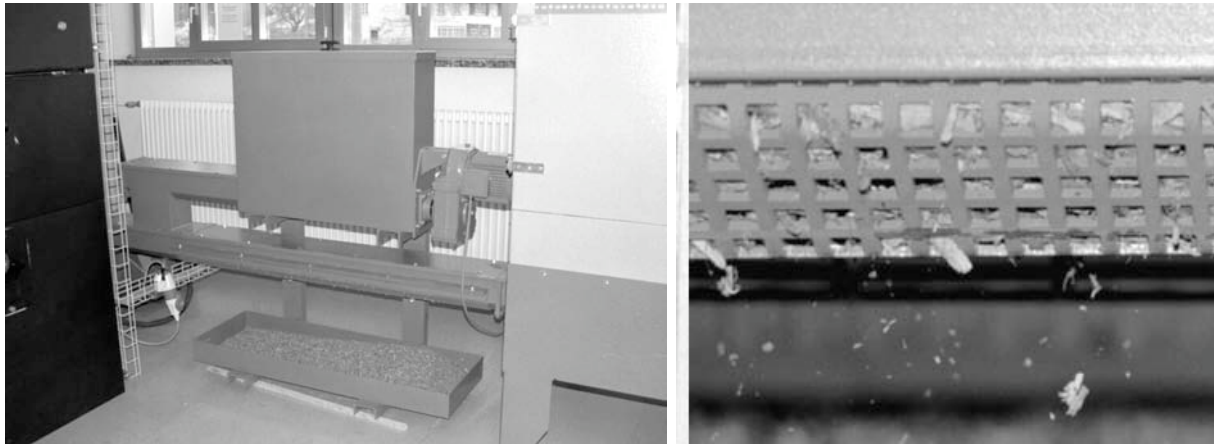


Abbildung 2 Vorrichtung zur kontinuierlichen Aussiebung des Feinanteils über ein Lochblech unterhalb der Förderschnecke (rechts). Der Feinanteil des Holzes fällt in eine Sammelwanne (links). Der so gewonnene Feinanteil wird in einen über der Förderschnecke befindlichen Behälter geleert und kann über eine zweite Förderschnecke bei Bedarf in den Kanal der Haupt-Förderschnecke zudosiert werden (links).

## 2.2 Messprogramm

Die Messungen finden vom März 2000 bis zum September 2001 statt. Die hier präsentierten Resultate stammen aus der ersten Versuchsphase. Aufgrund der Zielsetzung sollen in Versuchsreihen von mehreren Stunden Anlagenbetrieb die Einflüsse der wichtigsten Parameter auf Bildung und Emission der Partikel bestimmt werden.

Bei der Variation der Betriebsparameter wird von einem *Referenzbetrieb* ausgegangen, von dem aus einzelne Parameter signifikant verändert werden. Als Referenzbrennstoff dienen Waldhackschnitzel Buche mit einem Wassergehalt von rund 40% und geringem Fremd-, Fein- und Rindenanteil. Als Referenzparameter wurden eine Luftüberschusszahl von 1,8, ein Sekundärluftanteil von 35%, eine Feuerungsleistung von 75% der Nennleistung und ein Feuerraumunterdruck von 40 Pa festgelegt. Weiter werden beim Referenzversuch die Komponenten Abgasrezirkulation, Primärluftvorwärmung, Glutbettkühlung und Wassereindüsung nicht eingesetzt, so dass die Abgaszusammensetzung im Referenzversuch derjenigen einer konventionellen Feuerung vor Zyklon entspricht.

## 2.3 Messtechnik

Für die Überwachung aller feuerungstechnisch relevanter Größen werden konventionelle Messverfahren für CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO, Temperaturen, Leistungen und Volumenströme eingesetzt und die Daten kontinuierlich erfasst.

Zur Charakterisierung der Partikel im Abgas werden mehrere Messverfahren parallel eingesetzt: Zur Bestimmung der Gesamtstaubmasse werden Planfilter verwendet (Beladungsdauer 20 oder 30 Minuten), die anschliessend auch der chemischen Partikelanalytik dienen. Zur Ermittlung der Partikelgrößenverteilung werden ein elektrischer Niederdruckimpaktor (Electric Low Pressure Impactor, ELPI) sowie ein Scan-



ning Mobility Particle Sizer SMPS (bestehend aus DMA und CPC) eingesetzt. Die Messverfahren sind in [Mohr und Schmatloch 1998] beschrieben. Punktuell werden ergänzende Untersuchungen mit einem Andersen Kaskadenimpaktor, einem Kalman-Impaktor sowie einem Rasterelektronenmikroskop (REM) durchgeführt.

Bei der chemischen Partikelanalytik werden die Massenanteile der Elemente C, H, Cl, P, K, S, Na, Ca, Mg, Fe, Al, Mn und Zn bestimmt. Weiter wird zwischen organischem und anorganischem Kohlenstoff unterschieden, wobei der totale organische Kohlenstoff (TOC) als Differenz zwischen totalem Kohlenstoff (TC) und anorganischem Kohlenstoff (IC) bestimmt wird. Die Analyse von Chlorid erfolgt nach einer Heisswasserextraktion mittels Ionenchromatografie. Die Analyse von Alkali-, Erdalkali- und Schwermetallen sowie Phosphor und Schwefel wird durch offenen Aufschluss mit Salpetersäure direkt mittels Plasma-Emissions-Spektrometrie (ICP-OES) durchgeführt. Für die Analyse der Elemente C, H und N werden die Proben in einem katalytisch arbeitenden Verbrennungsofen bei 1000°C verbrannt und die entstehenden Gase mittels entsprechender Detektoren erfasst. Zur Bestimmung der chemischen Struktur wird zusätzlich Röntgenspektrometrie eingesetzt.

### 3 Resultate

Tabelle 2 (Folgende zwei Seiten):

Zusammenstellung der wichtigsten Versuchsdaten bei den untersuchten Betriebspunkten. Ausgegangen wird von einem Standardbetrieb mit für eine automatische Holzfeuerung geeigneten Feuerungseinstellungen (1. Spalte). In der 1. Zeile ist jeweils die Änderung zu diesem Standardbetrieb angegeben.  
\*\*: x-facher Feinanteil im Vergleich zur ursprünglichen, d.h. angelieferten Holz-schnitzelzusammensetzung;  
\*\*\*: Angabe des pro Versuch mittleren Maximalwerts anstatt der Standardabweichung, da die Grösse nicht symmetrisch um den Mittelwert schwankt (Abbildung 4)

Grösse	Einheit	Standard	Lambda=1.3	Lambda=1.4
<b>VORGABEN:</b>				
<b>Brennstoff</b>				
Brennstofftyp	Text	WHS Buche	WHS Buche	WHS Buche
Wassergehalt	%	40	40	40
Feinanteil	x-fach **	0	0	0
<b>Luft</b>				
Gesamtluftüberschuss	-	1.8	<b>1.3</b>	<b>1.4</b>
Anteil Sekundärluft	%	35	35	35
<b>Leistung</b>				
Wärmeleistung	% Nennleistung	75	75	75
<b>MESSUMFANG:</b>				
Anzahl 30-Min. Messungen	-	14	3	4
Anzahl Planfiltermessungen	-	18	6	4
Anzahl SMPS-Messungen	-	9	0	3
Anzahl Impaktormessungen	-	2	0	0
Anzahl chem. Analysen	-	1	0	1
<b>MESSDATEN:</b>				
<b>Holz</b>				
Wassergehalt	Massen-%		40	
Aschegehalt (wasserfrei)	Massen-%		0.6	
Heizwert (wasser- und aschefrei)	MJ/kg		18.25	
Schnitzel < 3 mm	Massen-%		1.3	
Schnitzel > 3 mm und < 3 cm	Massen-%		88.5	
Schnitzel > 3 cm	Massen-%		10.2	
C-Anteil	Massen-%		46.8	
K-Anteil	Massen-%		0.10	
Ca-Anteil	Massen-%		0.28	
S-Anteil	Massen-%		0.002	
H-Anteil	Massen-%		6.3	
Mg-Anteil	Massen-%		0.03	
Cl-Anteil	Massen-%		0.001	
Na-Anteil	Massen-%		<0.0013	
P-Anteil	Massen-%		0.009	
Fe-Anteil	Massen-%		0.006	
Zn-Anteil	Massen-%		0.001	
Mn-Anteil	Massen-%		0.001	
Al-Anteil	Massen-%		0.002	
<b>Feuerung</b>				
Wärmeleistung	kW	100 ± 5	109 ± 2	119 ± 5
Feuerraumtemperatur	°C	972 ± 10	993 ± 34	—
Glutbetttemperatur	°C	380 ± 40	319 ± 16	347 ± 35
<b>Abgas</b>				
Temperatur	°C	181 ± 12	164 ± 6	216 ± 8
Normvolumenstrom	Nm <sup>3</sup> /h	192 ± 12	161 ± 12	181 ± 5
Gesamtluftüberschuss	-	1.78 ± 0.04	1.28 ± 0.02	1.39 ± 0.02
CO <sub>2</sub> -Konzentration	Vol.-%	11.6 ± 0.3	16.0 ± 0.2	15.0 ± 0.3
CO-Konzentration ***	mg/Nm <sup>3</sup> (13%O <sub>2</sub> )	14 / 147	549 / 1172	21 / 628
<b>Partikel im Abgas</b>				
Partikelkonzentration	mg/Nm <sup>3</sup> (13%O <sub>2</sub> )	100 ± 11	116 ± 4	118 ± 7
Anteil über 1 µm	Massen-%	28 ± 1	—	—
Anzahl Partikel <700nm	10 <sup>7</sup> /Ncm <sup>3</sup> (13%O <sub>2</sub> )	10.5 ± 1.0	—	10.0 ± 1.3
Häufigster Partikeldurchmesser	nm	73 ± 4	—	70 ± 3
C-Anteil	Massen-%	6.7	—	7.9
Organischer C-Anteil	Massen-%	1.1	—	2.4
Anorganischer C-Anteil	Massen-%	5.7	—	5.5
K-Anteil	Massen-%	32.5	—	53
Ca-Anteil	Massen-%	6.0	—	3.0
S-Anteil	Massen-%	4.8	—	9.2
H-Anteil	Massen-%	2.7	—	1.7
Mg-Anteil	Massen-%	0.72	—	0.23
Cl-Anteil	Massen-%	0.49	—	—
Na-Anteil	Massen-%	0.27	—	0.68
P-Anteil	Massen-%	0.18	—	0.10
Fe-Anteil	Massen-%	0.083	—	0.051
Zn-Anteil	Massen-%	0.061	—	0.120
Mn-Anteil	Massen-%	0.058	—	0.048
Al-Anteil	Massen-%	0.055	—	0.022
Rest-Anteil, hauptsächlich O	Massen-%	45.4	—	24.0

Grösse	Einheit	Lambda=3.0	Feinant. höher	Feinant. hoch
<b>VORGABEN:</b>				
<b>Brennstoff</b>				
Brennstofftyp	Text	WHS Buche	WHS Buche	WHS Buche
Wassergehalt	%	40	40	40
Feinanteil	x-fach **	0	7	12
<b>Luft</b>				
Gesamtluftüberschuss	-	3.0	1.8	1.8
Anteil Sekundärluft	%	35	35	35
<b>Leistung</b>				
Wärmeleistung	% Nennleistung	75	75	75
<b>MESSUMFANG:</b>				
Anzahl 30-Min. Messungen	-	3	3	3
Anzahl Planfiltermessungen	-	6	4	6
Anzahl SMPS-Messungen	-	3	0	0
Anzahl Impaktormessungen	-	0	0	0
Anzahl chem. Analysen	-	0	1	0
<b>MESSDATEN:</b>				
<b>Holz</b>				
Wassergehalt	Massen-%	40	40	40
Aschegehalt (wasserfrei)	Massen-%	0.6	1.5	1.9
Heizwert (wasser- und aschefrei)	MJ/kg	18.25	18.27	18.29
Schnitzel < 3 mm	Massen-%	1.3	19.1	27.6
Schnitzel > 3 mm und < 3 cm	Massen-%	88.5	73.1	65.8
Schnitzel > 3 cm	Massen-%	10.2	7.8	6.6
C-Anteil	Massen-%	46.8	46.4	46.2
K-Anteil	Massen-%	0.10	0.11	0.11
Ca-Anteil	Massen-%	0.28	0.53	0.64
S-Anteil	Massen-%	0.002	0.002	0.002
H-Anteil	Massen-%	6.3	6.3	6.3
Mg-Anteil	Massen-%	0.03	0.04	0.04
Cl-Anteil	Massen-%	0.001	0.001	0.001
Na-Anteil	Massen-%	<0.0013	<0.0013	<0.0013
P-Anteil	Massen-%	0.009	0.011	0.013
Fe-Anteil	Massen-%	0.006	0.013	0.016
Zn-Anteil	Massen-%	0.001	0.001	0.001
Mn-Anteil	Massen-%	0.001	0.002	0.003
Al-Anteil	Massen-%	0.002	0.004	0.006
<b>Feuerung</b>				
Wärmeleistung	kW	98 ± 2	104 ± 10	108 ± 2
Feuerraumtemperatur	°C	673 ± 25	988 ± 5	989 ± 17
Glutbetttemperatur	°C	431 ± 8	322 ± 21	290 ± 24
<b>Abgas</b>				
Temperatur	°C	172 ± 4	197 ± 4	168 ± 4
Normvolumenstrom	Nm <sup>3</sup> /h	299 ± 9	196 ± 22	193 ± 3
Gesamtluftüberschuss	-	3.00 ± 0.03	1.77 ± 0.03	1.69 ± 0.01
CO <sub>2</sub> -Konzentration	Vol.-%	6.6 ± 0.1	11.5 ± 0.2	12.1 ± 0.1
CO-Konzentration ***	mg/Nm <sup>3</sup> (13%O <sub>2</sub> )	4300	19 / 67	25 / 200
<b>Partikel im Abgas</b>				
Partikelkonzentration	mg/Nm <sup>3</sup> (13%O <sub>2</sub> )	101 ± 13	111 ± 7	110 ± 7
Anteil über 1 µm	Massen-%	—	—	—
Anzahl Partikel <700nm	10 <sup>7</sup> /Ncm <sup>3</sup> (13%O <sub>2</sub> )	13.2 ± 0.6	—	—
Häufigster Partikeldurchmesser	nm	66 ± 3	—	—
C-Anteil	Massen-%	—	6.0	—
Organischer C-Anteil	Massen-%	—	1.0	—
Anorganischer C-Anteil	Massen-%	—	5.0	—
K-Anteil	Massen-%	—	29	—
Ca-Anteil	Massen-%	—	8.7	—
S-Anteil	Massen-%	—	5.8	—
H-Anteil	Massen-%	—	0.87	—
Mg-Anteil	Massen-%	—	0.97	—
Cl-Anteil	Massen-%	—	0.37	—
Na-Anteil	Massen-%	—	0.25	—
P-Anteil	Massen-%	—	0.25	—
Fe-Anteil	Massen-%	—	0.14	—
Zn-Anteil	Massen-%	—	0.088	—
Mn-Anteil	Massen-%	—	0.055	—
Al-Anteil	Massen-%	—	0.1	—
Rest-Anteil, hauptsächlich O	Massen-%	—	47.4	—

### 3.1 Referenzbetrieb

Die Anlage konnte bei den Vorgaben für den Referenzbetrieb nach Kapitel 3.2 in einem stabilen Zustand gehalten werden, wie der zeitliche Verlauf der Gesamtluftüberschusszahl zeigt (Abbildung 3).

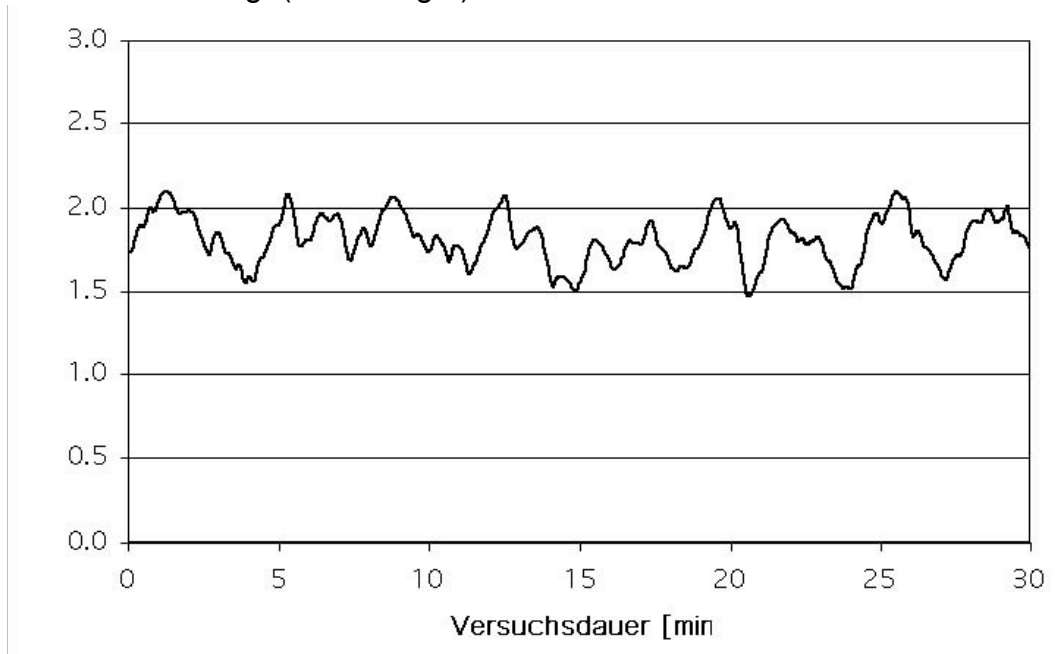


Abbildung 3 Verlauf der Gesamtluftüberschusszahl bei Referenzbetrieb während einer Messphase von 30 Minuten. Die durchschnittliche Gesamtluftüberschusszahl beträgt hier 1,81.

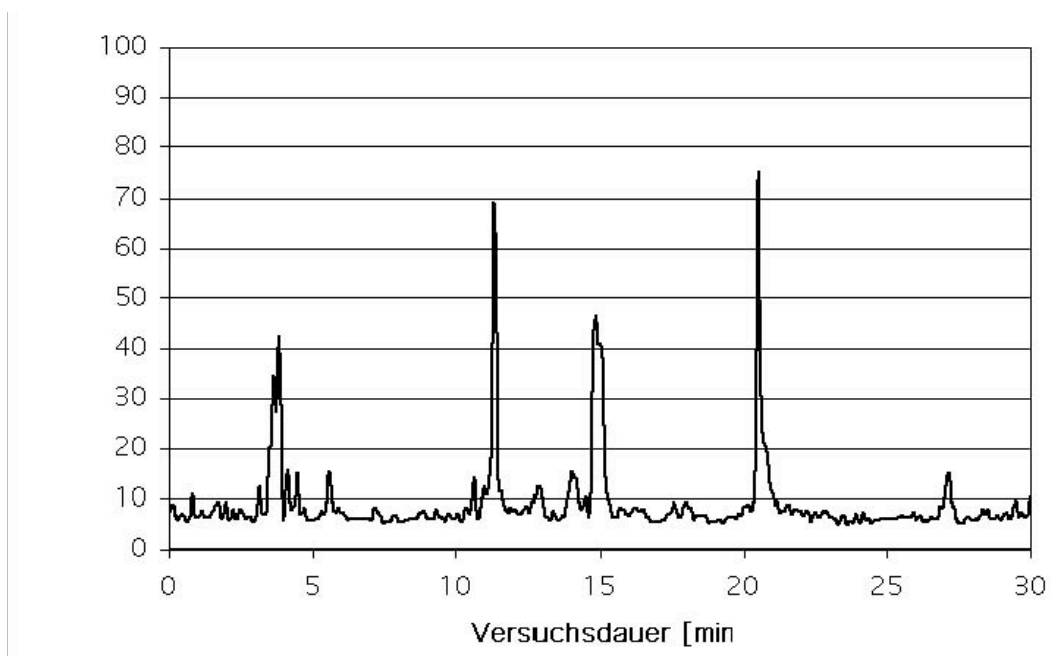


Abbildung 4 Verlauf des CO-Gehalts im Abgas bei Referenzbetrieb während einer Messphase von 30 Minuten. Typisch ist der Verlauf in Form eines Grundniveaus, welcher von einzelnen Konzentrationsspitzen überlagert wird. Der durchschnittliche CO-Gehalt liegt in der Größenordnung der Messgenauigkeit und unter  $20 \text{ mg/Nm}^3$  bei 13 Vol.-%  $\text{O}_2$ .

Der Verlauf des CO-Gehalts zeigt typischerweise ein Grundniveau von unter  $30 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$  bei 13 Vol.-%  $\text{O}_2$ , welchem einzelne kurzfristige Peaks bis maximal  $150 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$  bei 13 Vol.-%  $\text{O}_2$  überlagert werden. Ein typischer Verlauf der CO-Konzentration ist in Abbildung 4 dargestellt. Das tiefe Niveau der CO-Konzentration bestätigt den guten Ausbrand im Standardbetrieb. Höhere CO-Konzentrationen treten in den ersten drei Stunden nach Inbetriebnahme der Feuerungsanlage auf.

Die Wärmeleistung wird beim Standardbetrieb mit 75% der Nennleistung vorgegeben. Gemäss Wärmezähler wird so eine Wärmeleistung von etwa 100 kW abgegeben. Die oberhalb der Retorte gemessene Feuerraumtemperatur liegt knapp unter  $1000^\circ\text{C}$ . Die an einer festen Stelle in der Retorte gemessene Glutbetttemperatur (Gastemperatur im Glutbett) ist ein Mass für die Glutbetthöhe: Je höher das Glutbett ist, desto grösser ist der Abstand von der Flamme zur Temperaturmessstelle und desto tiefer ist dort die Temperatur. Die Glutbetttemperatur beträgt beim Standardbetrieb etwa  $380^\circ\text{C}$ . (Tabelle 2, 1. Spalte)

**Partikel im Abgas:** Zur Überprüfung der gewählten Staubmessmethode mit den Planfiltern wurden Parallelmessungen mit Filterhülsen, also dem Standardverfahren, bei einer Messdauer von 30 Min. durchgeführt. Mit dem Planfilter wurde eine Staubkonzentration von  $111.3 \text{ mg}/\text{Nm}^3$  bei 13%  $\text{O}_2$  ermittelt, mit der Filterhülse  $108.3 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$  bei 13%  $\text{O}_2$ . Die Verfahren stimmen im Rahmen der üblichen Messunsicherheit somit gut überein.

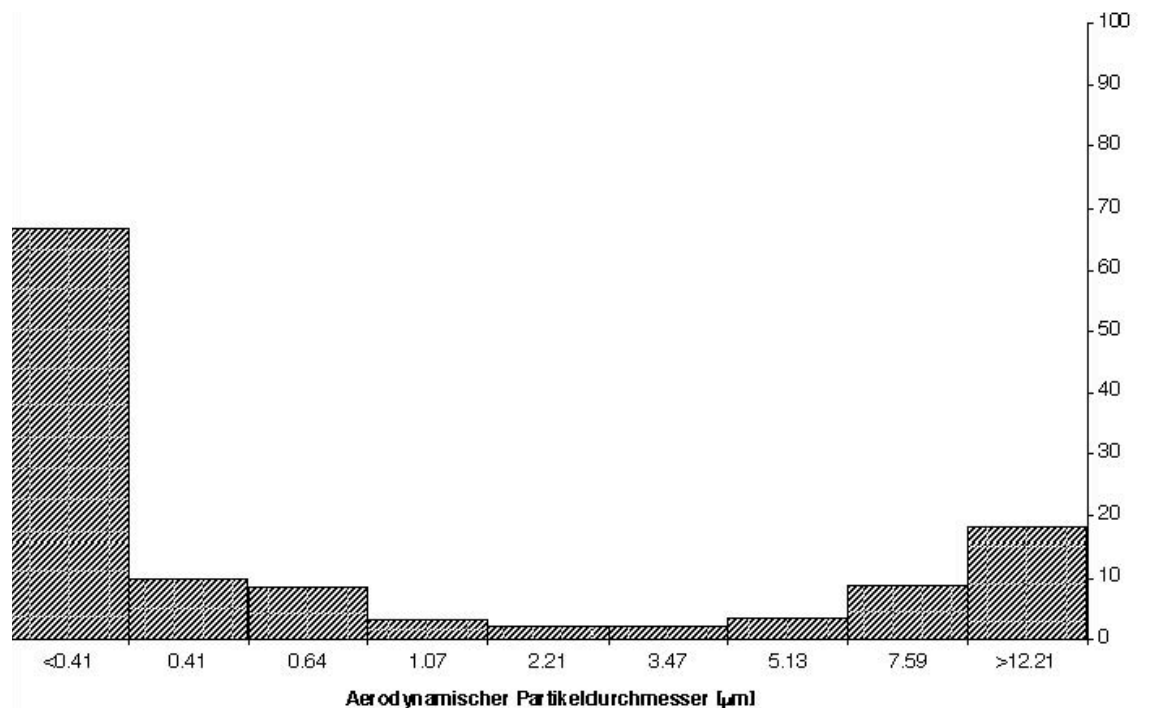


Abbildung 5 Beispiel einer Partikelmassenverteilung bei Standardbetrieb gemessen mit einem Andersen Impaktor. Die Gesamtstaubkonzentration beträgt  $124 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$  bei 13%  $\text{O}_2$ . Die Luftüberschusszahl liegt bei 1.79.

Die Partikelkonzentration beim Standardbetrieb liegt im Mittel bei  $100 \text{ mg/Nm}^3$  bezogen auf 13%  $\text{O}_2$  (Tabelle 2). Die mit einem Andersen Impaktor bestimmte Partikelgrößenverteilung (Abbildung 5) zeigt eine bimodale Massenverteilung mit einem Hauptpeak unter  $0.4 \mu\text{m}$  und einem zweiten, kleineren Peak bei etwa  $10 \mu\text{m}$ . (Aus den Messungen geht nicht hervor, ob der zweite Peak bei  $9 \mu\text{m}$  oder bei  $15 \mu\text{m}$  – also bei der 1. oder 2. Stufe des verwendeten Impaktors liegt –, da die 1. Stufe auch die viel grösseren Partikel beinhaltet.) Bei der Anzahlverteilung ist der zweite Peak nicht vorhanden, da er von wenigen Partikeln mit relativ grosser Masse stammt. Etwa drei Viertel der Partikelmasse stammt von Partikeln mit einem aerodynamischen Durchmesser unter  $1 \mu\text{m}$ . Diese Partikelfraktion kann auch mit einem idealen Trägheitsabscheider nicht zurückgehalten werden. Dies bedeutet, dass ein Staubgehalt von  $50 \text{ mg/Nm}^3$  (13%  $\text{O}_2$ ) mit Trägheitsabscheidern auch bei geeigneten Betriebsbedingungen nicht erreicht werden kann. Die Partikelgrößenverteilungen im submikronen Bereich, welcher mit den Andersen Impaktor-Messungen nur dreistufig und nur bis zu  $0.4 \mu\text{m}$  aufgelöst werden kann, wurden mit dem SMPS gemessen.

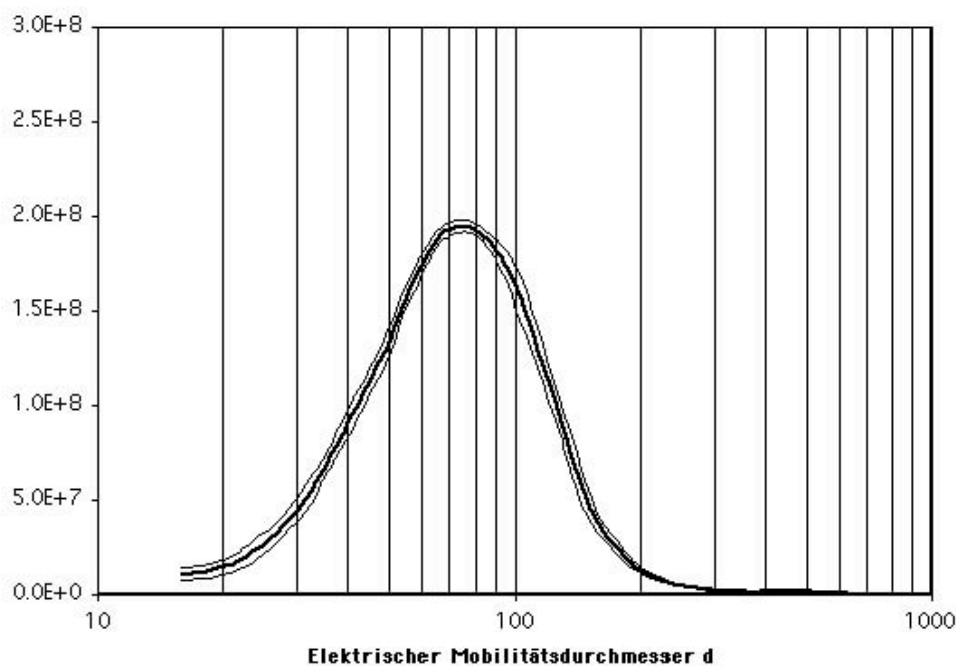


Abbildung 6 Reproduzierbarkeit der Messungen mit dem SMPS: Dargestellt sind die Mittelwertkurve und die zugehörigen Standardabweichungen der Partikelgrößenverteilung aus vier halbstündigen Messungen verteilt über 4 Stunden. Der häufigste Durchmesser beträgt  $75 \text{ nm}$  und die mittlere Konzentration der Partikel kleiner  $700 \text{ nm}$  ist  $1.02 \times 10^8 / \text{Ncm}^3$  bei 13%  $\text{O}_2$ .

Reproduzierbarkeit der SMPS-Messungen: Abbildung 6 zeigt die Mittelwertkurve und die zugehörigen Standardabweichungen aus vier halbstündigen Messungen am selben Tag. Die Standardabweichungen sind äusserst gering und die Reproduzierbarkeit ist sehr gut. In Abbildung 7 befindet sich dieselbe Darstellung für 9 halbstündige

Messungen an drei unterschiedlichen Tagen, insgesamt über einen Zeitraum von 2 Monaten. Die Standardabweichungen liegen auch hier noch unter 10% des Messwerts, sind aber deutlich höher als diejenigen in Abbildung 6. Die zusätzlichen Abweichungen können auf die Summe von unterschiedlichen Verschmutzungsgraden der Anlage, kleinen Veränderungen des Brennstoffs und geringfügigen Veränderungen des Messsystems zurückgeführt werden.

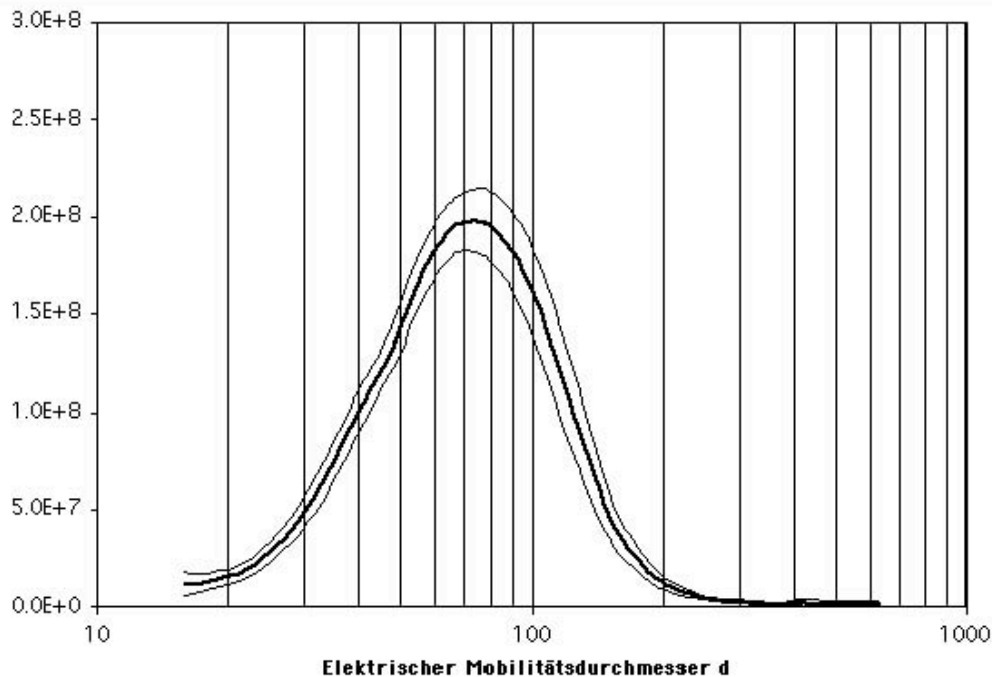


Abbildung 7 Partikelgrößenverteilung bei Standardbetrieb: Dargestellt sind die Mittelwertkurve und die zugehörigen Standardabweichungen aus 9 halbstündigen Messungen an drei verschiedenen Tagen über einen Zeitraum von zwei Monaten. Der häufigste Durchmesser beträgt  $73 \mu\text{m}$  und die mittlere Konzentration der Partikel kleiner  $700 \text{ nm}$  ist  $1.05 \times 10^8 / \text{Ncm}^3$  bei  $13\% \text{ O}_2$ .

Der häufigste Partikeldurchmesser liegt beim Standardbetrieb bei  $73 \pm 4 \text{ nm}$  (Tabelle 2). Dies ist in der gleichen Größenordnung wie bei den Partikeln aus Dieselmotoren (z.B. [Bach et al. 1998, Mayer et al. 1997]). Völlig unterschiedlich zu Partikeln aus motorischer Verbrennung ist hingegen die chemische Zusammensetzung, welche in Tabelle 2, 1. Spalte zusammengestellt ist. So liegt der Kohlenstoffanteil nur bei knapp  $7 \text{ Gew.}\%$  und der organische Kohlenstoffanteil beträgt  $1,1 \text{ Gew.}\%$ .

Der geringe organische Kohlenstoffanteil bedeutet, dass der Holzausbrand sehr gut ist (gute Verbrennungsbedingungen) und kaum Partikel aus unvollständiger Verbrennung (Tabelle 1) im Abgas vorhanden sind.

Die hohen Anteile an Kalium und Calcium zeigen, dass bei den vorliegenden Verbrennungsbedingungen der weitaus grösste Teil der Abgaspartikel aus Salzen besteht. Die mittels Röntgendiffraktion gefundenen kristallinen Strukturen sind in Tabelle 4 zusammengestellt. Weitere kristalline Verbindungen in relevanten Konzentrationen können mit dieser Methode nicht ausgeschlossen werden. Aufgrund des sehr hohen Kaliumgehalts von über  $30\%$  (Tabelle 2) wird klar, dass weitere Kaliumverbindungen mit geringerer Molmasse (z.B.  $\text{K}_2\text{O}$ ) vorhanden sein müssen.

Tabelle 4 Mengenanteile kristalliner Verbindungen der auf Planfilter gesammelten Partikelfractionen unter Standardversuchsbedingungen. Die Verbindungen Calcium-Magnesium-Carbonat und Kaliumchlorid sind aufgrund der Interferenzlinienvielzahl nicht eindeutig nachweisbar. Calciumcarbonat ist in geringen Mengen auch im Blindfilter vorhanden.

Mengenanteil:	Kristalline Verbindungen:	Mineralname:	Chem. Formel
gross	Calciumcarbonat	Calcit	CaCO <sub>3</sub>
mittel	Kaliumsulfat	Arcanit	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
	Calcium-Magnesium-Carbonat	Dolomit	CaMgCO <sub>3</sub>
	Calciumoxid	Lime	CaO
klein	□-Kaliumsulfat	—	K <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>7</sub>
	Magnesiumoxid	Periklas	MgO
	Kaliumchlorid	Sylvit	KCl

### 3.2 Variation des Luftüberschusses

Zur Beurteilung des Einflusses der Luftüberschusszahl bei gleicher Luftstufung (35% Sekundärluft) wurde eine Variation in stationären Betriebszuständen von 1,3 bis 3,0 durchgeführt. Die zugehörigen Messdaten sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

Der Einfluss auf die Partikelkonzentrationen sind in diesem Variationsbereich relativ gering (Abbildung 8). Die Senkung der Luftüberschusszahl von 1,8 auf 1,4 bzw. 1,3 bewirkt eine Zunahme der Partikelkonzentration um etwa 20%, während die Erhöhung der Luftüberschusszahl von 1,8 auf 3,0 zu keiner signifikanten Änderung der Partikelkonzentration führt.

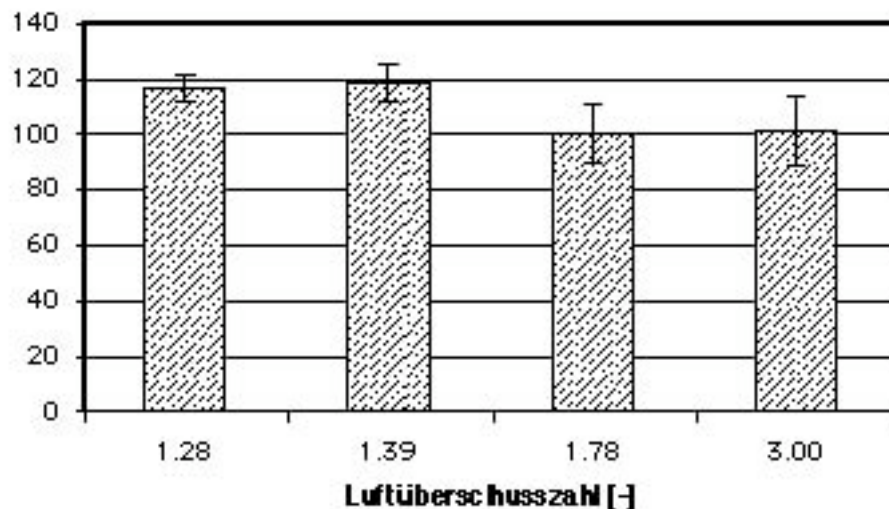


Abbildung 8 Partikelkonzentrationen im Holzfeuerungsabgas in Abhängigkeit von der Luftüberschusszahl bei gleicher Luftstufung (35% Sekundärluft) und Feuerungsleistung (75% der Nennleistung).

Auch bei Betrachtung der submikronen Partikelgrößenverteilungen sind die Unterschiede aufgrund der Luftüberschussvariation relativ klein (Abbildung 9). Der häufigste Partikeldurchmesser liegt stets zwischen 60 nm und 80 nm. Durch die Senkung der Luftüberschusszahl von 1,8 auf 1,4 steigt die Anzahl der submikronen Par-



tikel (Tabelle 2) nicht signifikant, obwohl die Gesamtpartikelmasse um knapp 20% angestiegen ist (Abbildung 8). Die Steigerung der Luftüberschusszahl von 1,8 auf 3,0 bewirkt einen Anstieg der Anzahl submikroner Partikel um etwa 25%, obwohl die Gesamtpartikelmasse unverändert bleibt. Aufgrund dieser Resultate ist zu vermuten, dass der Anteil an submikronen Partikeln mit steigendem Luftüberschuss im Bereich von 1,4 bis 3,0 (35% Sekundärluft) etwas ansteigt.

Die elementare Zusammensetzung der Partikel bei den Luftüberschusszahlen 1,4 und 1,8 sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Der Anteil des Elements Sauerstoff wurde nicht bestimmt, wobei davon ausgegangen werden kann, dass der Massenanteil des Sauerstoffs etwa dem nicht bestimmten Rest entspricht.

Der Anteil an organischem Kohlenstoff steigt bei Senkung der Luftüberschusszahl von 1,8 auf 1,4 nur geringfügig um 1,3 Gew.-% auf 2,4 Gew.-%, was auch etwa der Änderung des Gesamtkohlenstoffanteils entspricht. Der Partikelanteil aus unvollständiger Verbrennung ist also auch bei einer Luftüberschusszahl von 1,4 (35% Sekundärluft) gering.

Der tiefere Luftüberschuss von 1,4 und damit die geringere zur Verfügung gestellte Menge an Sauerstoff bewirkt auch in den Abgaspartikeln einen geringeren Anteil an Sauerstoffatomen (24% anstatt 48%). Hingegen ist der Anteil an Kalium noch höher (über 50%). Aufgrund des Verhältnisses zwischen Kalium und Sauerstoff ist zu schliessen, dass vor allem der Anteil an niedrigmolaren Kaliumverbindungen wie Kaliumoxid ansteigt.

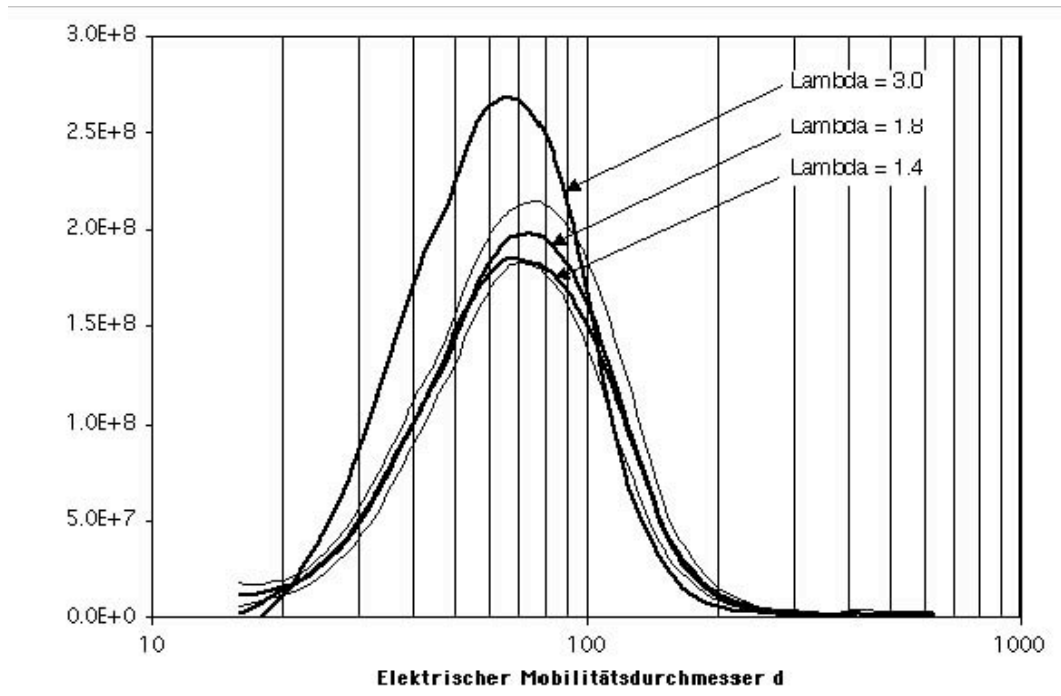


Abbildung 9 Einfluss der Luftüberschusszahl Lambda auf die Bildung submikroner Partikel bei gleicher Luftstufung (35% Sekundärluft) und Feuerungsleistung (75% der Nennleistung). Für die Luftüberschusszahl von 1,8 ist neben der Mittelwertkurve die Standardabweichungen eingetragen.

### 3.3 Variation des Feinanteils im Brennstoff

Die bis anhin dargestellten Untersuchungen wurden alle mit Buchen-Waldhackschnitzeln mit geringem Feinanteil durchgeführt. Der Massenanteil an Schnitzeln unter 3 mm lag bei 1,3%. Zur Beurteilung des Einflusses der Schnitzelgrösse wurde der vorgängig dem Brennstoff entnommene Feinanteil in grossen Mengen zudosiert, so dass der verwendete Brennstoff gegenüber dem Ausgangsmaterial etwa das 7-fache bzw. das 12-fache an Feinanteil aufweist. Der Massenanteil an Schnitzeln unter 3 mm liegt dann bei 19,1% bzw. bei 27,6%. Die Versuche mit erhöhtem Feinanteil sind dem Standardversuch in Tabelle 2 gegenübergestellt.

Beim Versuch mit 12-fach überhöhtem Feinanteil und gleichem Holzeinschub über die Förderschnecke (gleiches Schüttvolumen) sinkt die Luftüberschusszahl geringfügig von 1,78 auf 1,69 ab.

Auf die Partikelkonzentration im Abgas hat die hohe Menge an Feinanteil keine signifikante Auswirkung. Der Mittelwert steigt von  $100 \text{ mg/Nm}^3$  auf  $111 \text{ mg/Nm}^3$  bzw.  $110 \text{ mg/Nm}^3$  an (Tabelle 2). Auch die elementare Zusammensetzung der Abgaspartikel aus der Verbrennung mit geringem Feinanteil (Standardbetrieb) und hohem Feinanteil (7-fach überhöht) zeigt nur geringfügige und nicht signifikante Unterschiede.

Der Feinanteil bei Waldhackschnitzeln Buche scheint somit keinen wesentlichen Einfluss auf die Partikelbildung zu haben. Rückschlüsse auf den Einfluss noch feinerer Anteile wie zum Beispiel Sägespäne sind damit allerdings nicht möglich.

## 4 Schlussfolgerungen

Die Verbrennung von Buchen-Waldhackschnitzeln mit gutem Ausbrand führt in der untersuchten Unterschubfeuerung ohne Zyklon zu Staubgehalten im Abgas zwischen  $85 \text{ mg/Nm}^3$  und  $135 \text{ mg/Nm}^3$  bei 13 Vol.-%  $\text{O}_2$  für einen Betrieb in folgenden Betriebsbereichen:

- Feinanteil kleiner 3 mm zwischen 1,3 Gew.-% und 27,6 Gew.-%
- Luftüberschusszahl zwischen 1,3 und 3,0  
mit Flammtemperaturen von  $640^\circ\text{C}$  bis  $1020^\circ\text{C}$ .

Die Veränderung der Betriebsparameter in diesen Bereichen hat somit den Gesamtstaubgehalt im Abgas innerhalb einer Bandbreite von lediglich rund einem Faktor 1,6 beeinflusst.

Auch auf die Partikelgrössenverteilung im submikronen Bereich ist der Einfluss der erwähnten Parameter gering. Es liegt stets eine monomodale Anzahlverteilung vor, wobei der häufigste Partikeldurchmesser zwischen 60 nm und 80 nm liegt. Etwas grösser sind die Unterschiede bei der Anzahl submikroner Partikel (unter 700 nm), wo die Werte zwischen  $8,4 \cdot 10^7/\text{Ncm}^3$  und  $13,8 \cdot 10^7/\text{Ncm}^3$  schwanken, was wie beim Gesamtstaubgehalt etwa einem Faktor 1,6 entspricht.

In Tabelle 5 ist zusammengestellt, welche Feuerungsparameter auf welche Partikelkenngrösse einen signifikanten Einfluss zeigte.

Tabelle 5 Einfluss verschiedener Feuerungsparameter auf charakteristische Grössen der Abgaspartikel. \*Die Feuerraumtemperatur ist in den bisherigen Versuchen noch nicht unabhängig von der Lufti  
 -: keine signifikante Änderung feststellbar;  
 ?: aufgrund der bisherigen Ergebnisse keine Aussage möglich.

Auswirkung auf	Gesamt-Staubgehalt	Anzahl Submikroner Partikel	Häufigster Partikeldurchmesser	Anteil Organischer Kohlenstoff	Anteil Sauerstoff
Erhöhung von					
Luftüberschuss 1,4 auf 1,8	Abnahme	–	–	Abnahme	Zunahme
1,8 auf 3,0	–	Zunahme	–	?	?
Feuerraumtemperatur* 670°C auf 1000°C	–	?	–	?	?
Feinanteil < 3mm 1,3 auf 27,6 Gew.-%	–	?	?	–	–

Im Gegensatz zur Anzahlverteilung sind bei der Massenverteilung auch Partikel mit Korngrössen über 1  $\mu\text{m}$  relevant. Für einen Standardversuch mit üblichen Feuerungseinstellungen wurde mittels Andersen Kaskadenimpaktor eine bimodale Verteilung gefunden, welche nebst dem Peak im submikronen Bereich einen zweiten bei rund 10  $\mu\text{m}$  aufweist (Abbildung 5). Der Partikelmassenanteil mit Partikeldurchmessern über 1  $\mu\text{m}$  liegt bei etwa einem Viertel. Selbst mit einem idealen Trägheitsabscheider, welcher alle Partikel grösser als 1  $\mu\text{m}$  abscheidet und unter Berücksichtigung der tiefsten gemessenen Partikelkonzentration von 85  $\text{mg}/\text{Nm}^3$  kann somit eine Partikelkonzentration von 50  $\text{mg}/\text{Nm}^3$  nicht erreicht werden.

Die Partikel der untersuchten automatischen Holzfeuerung weisen eine ähnliche Grössenverteilung auf wie motorische Abgaspartikel, obwohl die chemische Zusammensetzung völlig unterschiedlich ist: Motorische Abgaspartikel bestehen grösstenteils aus Kohlenstoff, während die Partikel aus Holzfeuerungen hauptsächlich aus Salzen bestehen.

## Verdankung

Die vorliegende Untersuchung wird unterstützt vom Bundesamt für Energie und vom Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft.

## 5 Literatur

- Bach, C.; Heeb, N.; Mattrel, P. und Mohr, M.: Wirkungsorientierte Bewertung von Automobilabgasen, *MTZ Motortechnische Zeitschrift* 59 (1998) 11
- BUWAL: *Heizenergie aus Heizöl, Erdgas oder Holz*, Schriftenreihe Umwelt Nr. 315, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, erarbeitet durch F. Kessler und R. Frischknecht, Bern 2000
- Dockery, D. et al.: An association between air pollution and mortality in six U.S. cities, *The New England Journal of Medicine* 24, Vol. 329, 9. Dezember 1993, 1753-1759
- Hasler, P. und Nussbaumer, T.: Aerosole aus Biomassefeuerungen: Grundlagen, Eigenschaften und Abscheidung. 5. *Holzenergie-Symposium*, 16. Oktober 1998, ETH Zürich, Bundesamt für Energie, Bern 1998, 45–74
- Mayer, A.; Czerwinski, J.; Matter, U.; Wyser, M.; Scheidegger, Kieser, D. und Weidhofer: VERT: Diesel Nano-Particulate Emissions: Properties and Reduction Strategies, *First International ETH-Workshop on Nanoparticle Measurements*, Laboratorium für Festkörperphysik, ETH Zürich, 1997
- Mohr, M. und Schmatloch, V.: Charakterisierung der Partikelemission aus Stückholzfeuerungen mit modernen Messtechniken, 5. *Holzenergie-Symposium*, 16. Oktober 1998, ETH Zürich, Bundesamt für Energie, Bern, 75–84
- Nussbaumer, T. und Hasler, P.: Bildung und Eigenschaften von Aerosolen aus Holzfeuerungen, *Holz als Roh-und Werkstoff* 57 (1999) 13–22