



Bundesamt für Energie
Office fédéral de l'énergie
Ufficio federale dell'energia
Uffizi federal d'energia

Programm Biomasse

Partikelabscheidung bei Holzfeuerungen mit Rotating Particle Separator RPS

ausgearbeitet durch

Dr. Michael Oser, Verenum, Langmauerstrasse 109, 8006 Zürich

PD Dr. Thomas Nussbaumer, Verenum, Langmauerstrasse 109, 8006 Zürich

unter Mitarbeit von

Hans-Peter Schaffner, Schmid AG Holzfeuerungen, 8360 Eschlikon

im Auftrag des

Bundesamtes für Energie

Inhaltsverzeichnis

1 Zusammenfassung	4
2 Einleitung.....	5
2.1 Motivation.....	5
2.2 Rotierender Partikelseparator RPS.....	5
2.3 Vorgehen.....	6
3 Staubmessungen mit aussenliegendem Quarzwatte-Filter nach BUWAL.....	7
3.1 Methode.....	7
3.2 Resultate.....	8
3.3 Diskussion.....	8
4 Staubmessungen mit dem kontinuierlichen Messgerät FH62 E	11
4.1 Einleitung.....	11
4.2 Methode.....	12
4.3 Vergleich mit Standardmessmethode.....	14
4.4 Resultate.....	14
4.5 Diskussion.....	16
5 Ansätze zur Optimierung des RPS.....	18
5.1 Filterabreinigung.....	18
5.2 Vorabscheider	19
5.3 Partikelaustrag	19
5.4 Verhinderung Leckagestrom vom Rohgas zum Reingas.....	19
5.5 Temperaturabsenkung.....	20
6 Literatur	21

1 Zusammenfassung

Ein rotierender Partikelseparator (RPS) wurde für die Anwendung der Partikelfiltration bei Abgasen von automatischen Holzfeuerungen optimiert. Dieser RPS wurde an einer Feuerung mit einer maximalen Leistung von 550 kW ausgetestet.

Zur Beurteilung des Abscheidegrads des RPS und dem daraus resultierenden Reingaspartikelgehalt wurden zwei unterschiedliche Messsysteme verwendet. Zum einen wurden Messungen mit einem Standard-Messverfahren nach BUWAL [1996] mit aussenliegendem, d.h. nicht im Abgasstrom befindlichen Filter, welches aus einer mit Quarzwatte gestopften Filterhülse besteht, durchgeführt. Zum anderen wurde ein Messsystem mit einem kontinuierlichen Partikelmessgerät entwickelt. Dieses Messsystem erlaubte es, Partikelkonzentrationen abwechselungsweise im Roh- und Reingas kontinuierlich zu messen. Ergänzend dazu wurde der Druckverlust über dem RPS gemessen. Daraus kann der Widerstandsbeiwert als Kenngrösse für den Verschmutzungsgrad des RPS bestimmt werden. Im weiteren wurden Messungen am vollständig gereinigten RPS (wozu der Ausbau des Filterelementes notwendig ist) und am während mehreren Monaten im Betrieb gewesenen RPS durchgeführt.

Die Messungen haben gezeigt, dass mit dem vollständig gereinigten RPS je nach Holzart, Rohgaspartikelgehalt und Abgasvolumenstrom Abscheidegrade zwischen 30% und 90% erreicht werden können. In diesem Zustand lagen die Partikelkonzentrationen im Reingas bei Waldhackschnitzel und Palettholz typischerweise um 50 mg/Nm^3 , bei Altholz bei etwa 200 mg/Nm^3 .

Im weiteren haben die Messungen gezeigt, dass die Druckluftabreinigung das RPS-Filterelement nur teilweise reinigen kann und das Filterelement über die Betriebsdauer immer mehr verschmutzt. Dadurch steigt auch der Druckverlust am RPS deutlich an. Nach einer Betriebszeit von etwa 3 Monaten nach der letzten vollständigen Reinigung lagen die Abscheidegrade lediglich noch zwischen 3% und 49% und die Partikelgehalte im Reingas betrugen – mit Ausnahme von einem von insgesamt zwölf Betriebspunkten – über 200 mg/Nm^3 .

Insgesamt zeigen die Resultate somit auf, dass der RPS in neuwertigem Zustand gute Abscheidegrade erreichen kann, dass jedoch in der vorliegenden Ausführung wegen der Verschmutzung kein sinnvoller Dauerbetrieb gewährleistet ist.

2 Einleitung

2.1 Motivation

Die Abgasreinigung erfolgt bei automatischen Holzfeuerungen bis 5 MW in der Regel mit Multizyklonen. Bei der Verbrennung von naturbelassenem Holz kann der Staubgrenzwert nach Luftreinhalte-Verordnung von 150 mg/Nm^3 (bei 13 Vol.-% O_2 für Anlagen bis 1 MW bzw. bei 11 Vol.-% O_2 ab 1 MW) meistens eingehalten werden. In zahlreichen Ländern oder Regionen werden jedoch vermehrt Grenzwerte von 50 mg/Nm^3 oder 100 mg/Nm^3 gefordert. Solche Staubgehalte können mit Multizyklonen in den meisten Fällen nicht erreicht werden. Aus diesem Grund interessieren leistungsfähigere Verfahren zur Staubabscheidung. In Frage kommen die als Stand der Technik verfügbaren Elektro- und Gewebefilter. Allerdings sind die Investitionskosten dieser Filter für automatische Holzfeuerungen bis 5 MW sehr hoch, so dass entsprechende Anlagen wirtschaftlich uninteressant werden.

Von Interesse sind deshalb Abscheider, welche gegenüber Multizyklonen höhere Abscheidegrade erwarten lassen und gleichzeitig gegenüber Elektro- und Gewebefilter geringere Investitionskosten verursachen. Ein solcher Abscheider ist der in diesem Projekt untersuchte rotierende Partikelseparator (RPS). Das für andere Anwendungen bereits erfolgreich eingesetzte RPS wurde in dieser Arbeit in Bezug auf die Eignung bei automatischen Holzfeuerungen untersucht.

2.2 Rotierender Partikelseparator RPS

Grundprinzip des RPS: Der Abgasstrom wird durch kleine Kanäle eines rotierenden Körpers hindurchgeführt. Dabei werden die Partikel im Abgas durch die Zentrifugalkräfte an die Oberfläche der Kanäle bewegt und dort abgeschieden. Durch die Druckluftabreinigung werden die abgeschiedenen und agglomerierten Partikel aus diesen Kanälen ausgeblasen und gelangen in den Staubsammelbehälter (Abbildung 2.1).

Ein wesentlicher Vorteil des RPS im Vergleich zu anderen Trägheitsabscheidern liegt in den geringen Transportwegen, welche aufgrund der Trägheitskräfte zurückgelegt werden müssen.

Je nach Anwendung und Randbedingungen sind verschiedene Ausführungen des RPS möglich. Für die vorliegende Arbeit wurde die Variante ohne Zyklonvorabscheider und mit radialem Partikelaustrag gewählt (Abbildung 2.1). Im weiteren wurde die Abdichtung zwischen Rohgasseite und Reingasseite als Lamellendichtung ausgeführt.

Bei der Auslegung des verwendeten RPS wurde berücksichtigt, dass der Hauptteil der Partikel im Abgasstrom aus einer automatischen Holzfeuerung Durchmesser unter $1 \mu\text{m}$ aufweisen [Hasler und Nussbaumer, 1997]. Um solche Partikel im RPS effizient abscheiden zu können müssen hohe Zentrifugalkräfte wirken, weshalb der Durchmesser des rotierenden Filterelementes gross (50 cm) und die Drehzahl hoch (50 Hz) gewählt wurde.

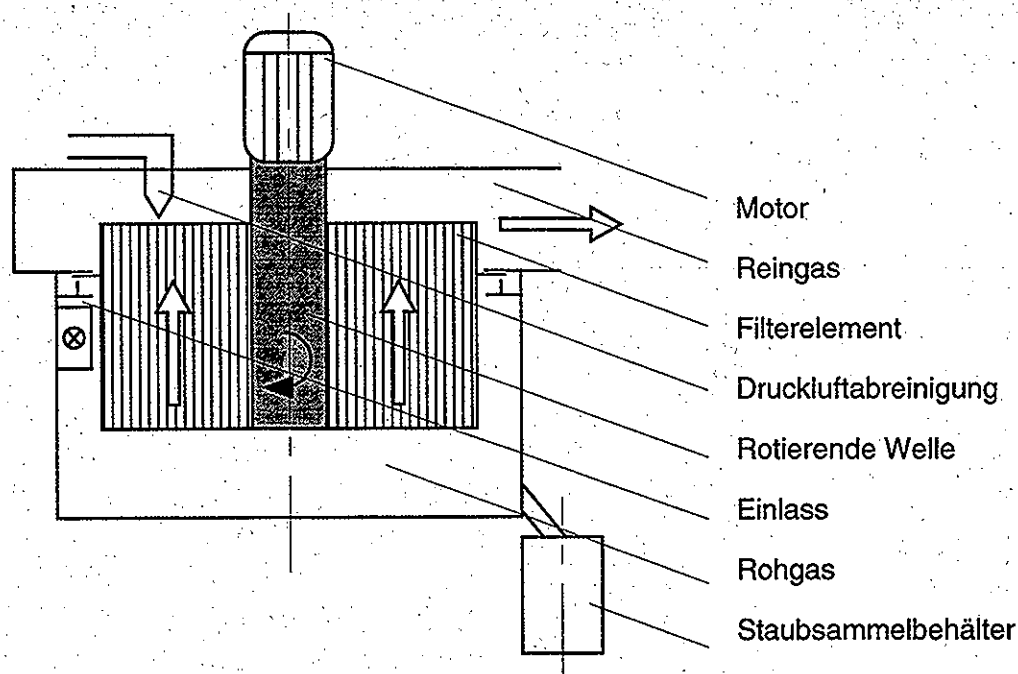


Abbildung 2.1: Aufbau des rotierenden Partikelseparators RPS. Das partikelbeladene Abgas strömt über den Einlass tangential ins RPS ein und gelangt in das aus axial verlaufenden Kanälen bestehende, rotierende Filterelement, in welchem die Partikel aufgrund von Zentrifugalkräften auf die Kanaloberfläche treffen und dort haften. Das gereinigte Abgas (Reingas) strömt aus dem RPS aus. In festgelegten Abständen werden die agglomerierten Partikel durch Druckluft aus den Kanälen des Filterelements ausgeblasen und gelangen in den Staubsammelbehälter.

Die theoretische Berechnung der Strömung und Partikelabscheidung im RPS wurde von Brouwers entwickelt [Brouwers 1995 und 1996] und zur Beurteilung der durchgeführten Messungen vergleichend herbeigezogen.

2.3 Vorgehen

Zur Beurteilung und Charakterisierung des Abscheidegrads wurden zwei unterschiedliche Messmethoden angewendet, welche beide den Staubgehalt in Roh- und Reingas bestimmen. Zum einen wurde ein Standardmessverfahren mit aussenliegendem Filter mit gestopften Quarzwatte-Hülsen gemäss BUWAL durchgeführt (Abschnitt 4). Zum andern wurde ein speziell für diese Anwendung entwickeltes Messverfahren unter Verwendung eines kontinuierlichen Messgerätes benutzt (Abschnitt 5), welche über eine kontinuierliche Messdatenerfassung eine bessere Zeitauflösung sowie eine Vielzahl von Einzelmessungen und damit eine statistische Auswertung ermöglicht.

Die Messungen wurden an einer automatischen Holzfeuerung mit einer Maximalleistung von 550 kW durchgeführt. Angepasst an die bestehenden Grenzwerte in diesem Feuerungsgrössenbereich wurden die Staubgehalte auf 13 Vol.-% O₂ bezogen.

3 Staubbmessungen mit aussenliegendem Quarzwatte-Filter nach BUWAL

Diese Partikelkonzentrationsmessungen in Roh- und Reingas mit aussenliegendem, d.h. nicht im Abgasstrom befindlichen Filter mit Quarzwatte gestopfter Filterhülse wurden vor den in Abschnitt 4 beschriebenen Messungen mit einem kontinuierlichen Partikelmessgerät durchgeführt und lieferten für den Messaufbau mit dem kontinuierlichen Partikelmessgerät zusätzliche Auslegedaten.

3.1 Methode

Ein isokinetisch entnommener Teilvolumenstrom wurde durch eine mit Quarzwatte gestopfte Filterhülse geführt und die in der Filterhülse abgeschiedene Partikelmasse gravimetrisch bestimmt. Die Feststoffkonzentration im Hauptvolumenstrom wurde aus dem abgesaugten Teilvolumenstrom und der darin gemessenen Feststoffmenge berechnet. Die Versuche wurden gemäss den Angaben in Empfehlungen über die Emissionsmessung von Luftfremdstoffen bei stationären Anlagen des BUWAL durchgeführt.

Zur Bestimmung des RPS-Abscheidegrads wurde jeweils bei gleichen Betriebseinstellungen zuerst eine Messung im Rohgas, dann eine im Reingas durchgeführt. Eine Einzelmessung dauerte 20 Minuten.

Es wurden drei verschiedene Holzarten verbrannt, nämlich Waldhackschnitzel, Palettholz und Altholz, wobei die Feuerung für jede Holzart mit zwei unterschiedlichen Leistungsstufen betrieben wurde. Durch die Leistungsänderungen an der Feuerung wurde auch der Abgasvolumenstrom variiert, was einen Einfluss auf den Abscheidegrad des RPS haben könnte, weil damit die Geschwindigkeiten und somit auch die Verweilzeiten in den Kanälen des Filterelements verändert werden. Insgesamt wurden je 12 Messungen in Roh- und Reingas durchgeführt.

3.2 Resultate

Die aus den Messungen erhaltenen Staubgehalte und Abscheidegrade sind in Tabelle 3.1 in Abhängigkeit der Einflussgrößen Holzart und Abgasvolumenstrom zusammengestellt.

Tabelle 3.1: Staubgehalte in Roh- und Reingas einer automatischen Holzfeuerung bezogen auf 13 Vol.-% O₂ sowie der daraus resultierende Abscheidegrad des rotierenden Partikel-separators RPS bei unterschiedlichen Holzarten und Abgasvolumenströmen.

Holzart	Abgas- volumenstrom	Staubgehalt im Rohgas (13%O ₂)	Staubgehalt im Reingas (13%O ₂)	Abscheidegrad RPS
[-]	[Bm³/h]	[mg/Nm³]	[mg/Nm³]	[%]
Waldhackschnitzel	1770	387	37	90
Waldhackschnitzel	1600	569	110	81
Waldhackschnitzel	690	97	51	47
Waldhackschnitzel	680	77	42	45
Palettholz	1830	147	44	70
Palettholz	1790	242	64	73
Palettholz	1150	59	40	32
Palettholz	950	63	27	58
Altholz	1460	398	190	52
Altholz	1290	305	211	31
Altholz	1020	331	196	41
Altholz	910	281	186	34

3.3 Diskussion

Die Verbrennung von Waldhackschnitzeln und Palettholz zeigte Staubgehalte im Reingas, welche in der Nähe des angestrebten Wertes von 50 mg/Nm³ lagen. Lediglich eine Messung bei sehr hohem Rohgas-Staubgehalt lag mit 110 mg/Nm³ (bei 13 Vol.-% O₂) deutlich darüber. Beim Altholz hingegen lagen die Reingasgehalte wesentlich höher, nämlich bei etwa 200 mg/Nm³. (Tabelle 3.1) Mit dem RPS konnten also unter Verwendung geeigneter Holzarten und Feuerungseinstellungen Reingasgehalte von etwa 50 mg/Nm³ und somit das erhoffte Potential erreicht werden. Die Abscheidegrade lagen bei den 12 durchgeführten Messungen zwischen 30% und 90%.

Die Abscheidegrade wurden in Abbildung 3.1 mit berechneten Werten nach Brouwers (Abschnitt 2.2) für verschiedene mittlere Partikelgrößen (0.5 µm, 0.2 µm und 0.1 µm) unter der Annahme einer monomodalen Partikelgrößenverteilung (im Rohgas) verglichen, wobei von einer Normalverteilung mit einer Streuung von 2.5 ausgegangen wurde.

Nach Hasler und Nussbaumer [1997] liegen die mittleren Partikeldurchmesser im Abgas einer automatischen Holzfeuerung für verschiedene Holzarten (mit Ausnahme von Holzrinde) zwischen 0.1 µm und 0.35 µm. Die Abbildung 3.2 und Abbildung 3.3 zeigen die entsprechenden Partikelgrößenverteilungen für Waldhackschnitzel (naturbelassenes Holz) und Altholz. Bei den Waldhackschnitzeln liegt der mittlere Partikeldurchmesser knapp unter 0.2 µm, bei Altholz knapp darüber. Zur Beurteilung der Messwerte in Abbildung 3.1 anhand der Berechnungen nach Brouwers (Abschnitt 2.2) kann somit näherungsweise von einem mittleren Partikeldurchmesser von 0.2 µm ausgegangen werden.

Bei Volumenströmen bis etwa $1500 \text{ Bm}^3/\text{h}$ zeigt der Vergleich zwischen den Messungen und den Berechnungen nach Brouwers und unter der Annahme eines mittleren Partikeldurchmessers von $0.2 \mu\text{m}$ eine gute Übereinstimmung (Abbildung 3.1).

Bei Volumenströmen über $1500 \text{ Bm}^3/\text{h}$ wurden deutlich höhere Abscheidegrade erreicht als aufgrund der Berechnung erwartet wurde. Da zudem die Rohgasgehalte in diesem Volumenstrombereich wesentlich höher liegen als bei den in Abbildung 3.2 und Abbildung 3.3 dargestellten Messungen, wird vermutet, dass zusätzlich eine relevante Menge an grösseren Partikeln mit dem Abgasstrom mitgeführt wurde und möglicherweise eine bimodale Partikelgrößenverteilung vorlag (vgl. [Hüglin 1996]).

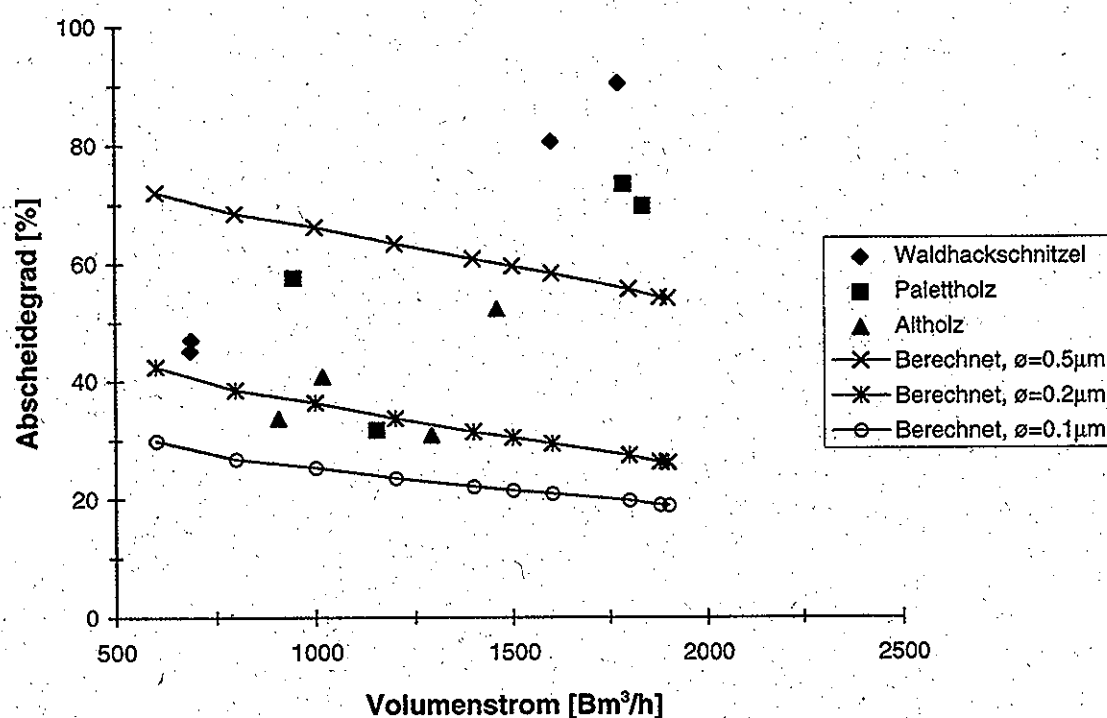


Abbildung 3.1: Vergleich der mit verschiedenen Holzarten gemessenen RPS-Abscheidegrade in Abhängigkeit vom Volumenstrom mit den berechneten Werten nach Brouwers für unterschiedliche mittlere Partikeldurchmesser unter der Annahme monomodaler Partikelgrößenverteilung im Rohgas (normalverteilt mit einer Streuung von 2.5). Für Volumenströme bis etwa $1500 \text{ Bm}^3/\text{h}$ kann von einem mittleren Partikeldurchmesser von $0.2 \mu\text{m}$ ausgegangen werden.

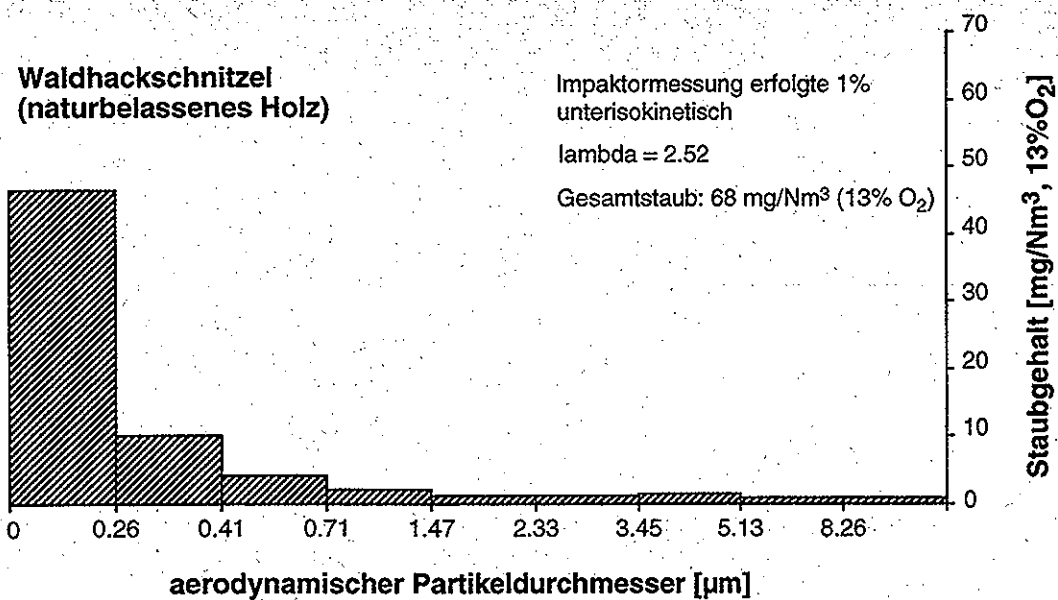


Abbildung 3.2: Partikelgrößenverteilung im Abgas einer Holzfeuerung unter Verwendung von Waldhackschnitzeln als Brennstoff nach Hasler und Nussbaumer [1997]. Die mit einem Andersen Kaskaden-Impaktor gemessenen Werte wurden (wie die Daten im vorliegenden Bericht) auf 13 Vol.-% O₂ bezogen.

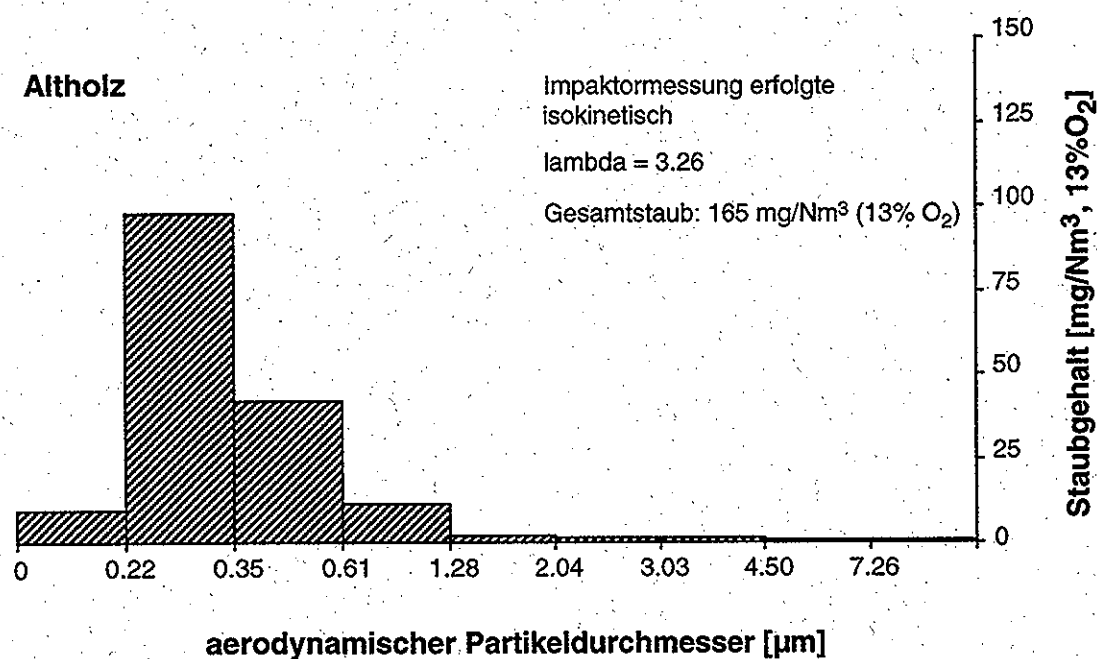


Abbildung 3.3: Partikelgrößenverteilung im Abgas einer Holzfeuerung unter Verwendung von Altholz als Brennstoff nach Hasler und Nussbaumer [1997]. Die mit einem Andersen Kaskaden-Impaktor gemessenen Werte wurden wie die übrigen Daten im vorliegenden Bericht auf 13 Vol.-% O₂ bezogen.

4 Staubmessungen mit dem kontinuierlichen Messgerät FH62 E

4.1 Einleitung

Um gegenüber den Standardmessverfahren zur Bestimmung der Partikelkonzentration in Abgasen eine gesteigerte Zeitauflösung zu erreichen und insgesamt auch eine grössere Anzahl Messungen durchführen zu können, was zu einer besseren statistischen Sicherheit führt, wurde ein kontinuierliches Partikelmessgerät eingesetzt. Damit sollen die im folgenden dargestellten Zusammenhänge untersucht werden.

Der RPS-Abscheidegrad und damit auch der Partikelgehalt im Reingas ist einerseits abhängig vom Rohgas, andererseits vom Zustand des RPS. Bedeutende Rohgasgrössen sind Volumenstrom, Partikelkonzentration und Partikelgrössenverteilung, bedeutende RPS-Grössen sind Geometrie, Drehzahl und Verschmutzung.

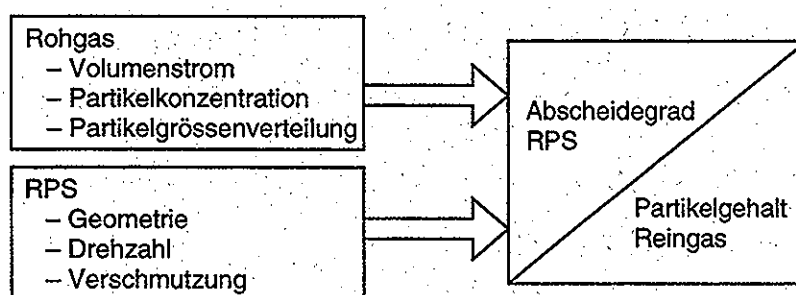


Abbildung 4.1: Schematische Darstellung der Beeinflussung von RPS-Abscheidegrad bzw. Partikelgehalt im Reingas.

Die Abbildung 4.1 zeigt, dass der RPS-Abscheidegrad und der Partikelgehalt im Reingas im wesentlichen von 6 Grössen abhängig sind. Diese wiederum werden von verschiedenen Grössen beeinflusst.

Der *Rohgasvolumenstrom* ist abhängig von der Einstellung der Holzfeuerung, insbesondere von der Brennstoffzufuhr, welche in der Regel über die Vorgabeleistung eingestellt wird und vom Luftüberschuss. Der Rohgasvolumenstrom wurde in dieser Untersuchung stets mitgemessen.

Partikelgehalt und Partikelgrössenverteilung im Rohgas sind ebenfalls abhängig von der Holzfeuerung sowie vom Brennstoff, wobei hier der genaue Zusammenhang nicht bekannt ist. In dieser Untersuchung wurde jeweils der Partikelgehalt im Rohgas mitgemessen. Zur Beurteilung der Partikelgrössenverteilung lagen die Kenntnisse aus [Hasler und Nussbaumer, 1997] vor.

Die auf die Anwendung der Partikelfiltration bei Holzfeuerungsabgasen optimierte *Geometrie* des RPS (Abbildung 2.1) wurde in der vorliegenden Untersuchung nicht variiert. Die *Drehzahl* wurde hingegen für einzelne Messpunkte verändert, allerdings nur in einer schmalen Bandbreite, da aus theoretischen Überlegungen klar ist, dass für die vorliegende Anwendung die Drehzahl hoch sein muss um gute RPS-Abscheidegrade zu erreichen (Abschnitt 2.2). Die an der verwendeten Anlage maximal erreichbare Drehzahl lag bei etwa 60 Hz. Die Standardeinstellung betrug 50 Hz.

Die *RPS-Verschmutzung* kann als Summe von zwei Verschmutzungskomponenten betrachtet werden: Einerseits von der Verschmutzung der Kanäle, welche durch die Abreinigung nicht mehr entfernt werden kann. Diese ist vor allem abhängig von den Hafteigenschaften der abgeschiedenen Rohgaskomponenten seit der letzten vollständigen Reinigung des RPS, wozu der RPS-Betrieb unterbrochen werden muss (Ausbau des Filterelementes). Andererseits von der Verschmutzung der Kanäle seit der letzten Abreinigung, wobei hier das Abreinigungsintervall von entscheidender Bedeutung ist. Weiter ist die Funktionsfähigkeit des Partikelaustrags wichtig, da andernfalls die abgereinigten Partikel sofort wieder auf das Filterelement gelangen und die Abreinigung zu keiner oder nur sehr kurzfristiger Minderung der RPS-Verschmutzung führt. Je stärker der RPS verschmutzt, desto höher wird der Widerstandsbeiwert des RPS, welcher hier aus dem gemessenen Druckverlust über dem RPS berechnet wurde (Abschnitt 4.2).

4.2 Methode

Kernstück des Messaufbaus ist das kontinuierliche Partikelmessgerät FH62 E. In diesem wird ein Volumenstrom über einen Filterbandausschnitt (Totalfilter) geführt und die Massenzunahme des Filters mit dem radiometrischen Prinzip der Beta-Strahlenabsorption gemessen. Nach einer bestimmten Filterbandbeladung (8000 μg) wird die Messung unterbrochen und eine neue Stelle des Filterbandes wird im Volumenstrom positioniert. Um zwischen den Filterwechseln genügend lange Messintervalle zu erhalten, musste das Abgas bei der vorliegenden Anwendung verdünnt werden. Der gesamte Messaufbau ist in Abbildung 4.2 dargestellt.

Sämtliche Messgrößen wurden über eine kontinuierliche Messdatenerfassung mit dem Programm Lab View aufbereitet und abgespeichert. Weiter wurden alle Ventile, Pumpen und Durchflussmessregler über die Instrumentensteuerung desselben Programms geschaltet (Abbildung 4.2), so dass die Messung über Tage automatisch ablief. Dabei wurde jeweils nach 10 Minuten von der Rohgasmessung auf die Reingasmessung umgeschaltet und umgekehrt.

Zur Bestimmung der Verdünnungen wurden die Sauerstoffkonzentrationen vor und nach den beiden Verdünnungsstufen gemessen. Um Kalibrierungsunterschiede zwischen mehreren Sauerstoffmessgeräten zu umgehen, wurden alle Messungen mit demselben Gerät durchgeführt, indem die verschiedenen Gase abwechslungsweise über das Messgerät geführt wurden.

Um den Einfluss des Abgasvolumenstroms (vgl. Abschnitt 4.1) beurteilen zu können, wurde dieser mit Hilfe eines im Zentrum des Abgaskanals positionierten Pitotrohrs bestimmt.

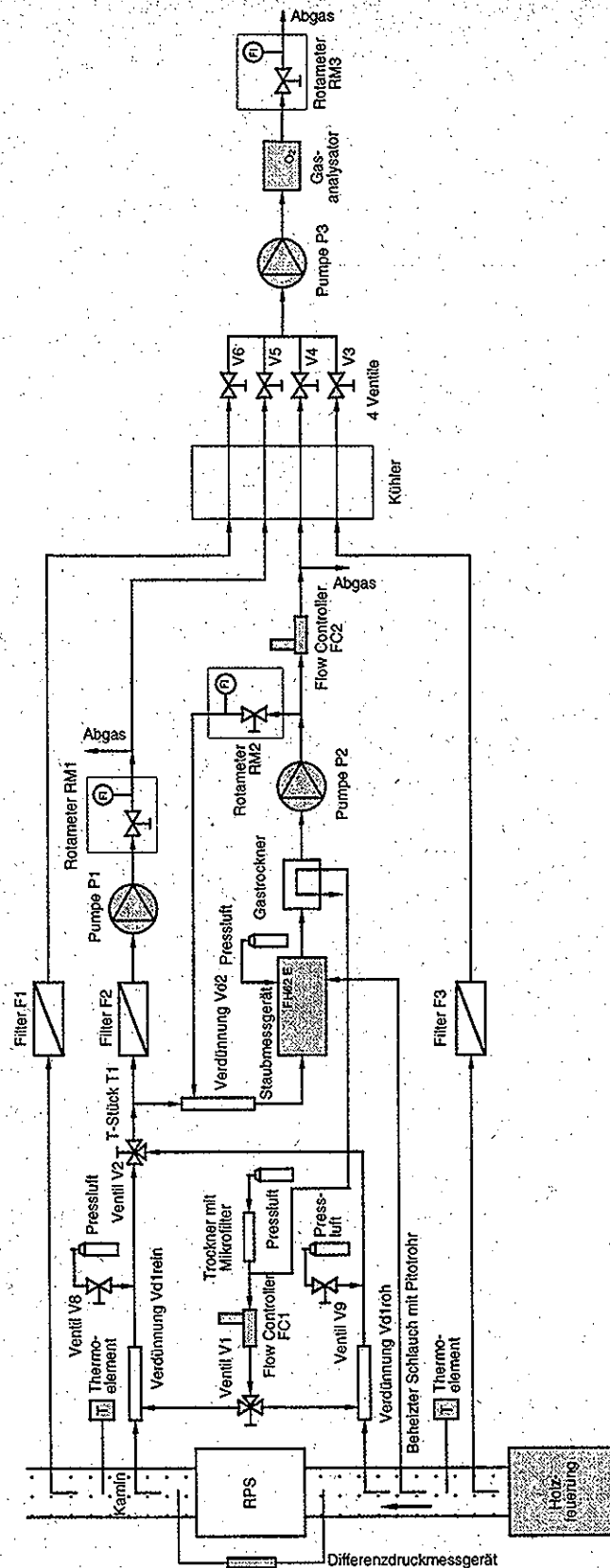


Abbildung 4.2: Schematische Darstellung der Partikelkonzentrationsmessung mit dem FI 102 E. Die ausgefüllt dargestellten Komponenten waren mit der Mess- und Steuersoftware verbunden. Durch umschalten der Ventile V1 und V2 wird abwechselungsweise Roh- oder Reingas (zweistufig verdünnt) über das Partikelmessgerät geführt.

Weiter wurde der RPS-Druckverlust über eine Differenzdruckdose gemessen, woraus sich der Widerstandsbeiwert des RPS – ein Mass für die RPS-Verschmutzung (Abschnitt 4.1) – berechnen liess:

$$\zeta_{RPS} = \frac{2 \cdot \Delta p_{RPS}}{\rho \cdot v^2} \quad (\text{Gl. 4.1})$$

mit: ζ_{RPS} Widerstandsbeiwert des RPS
 Δp_{RPS} Druckverlust über dem RPS
 ρ Abgasdichte
 v Mittlere Geschwindigkeit des Abgases

4.3 Vergleich mit Standardmessmethode

Um die Funktionsfähigkeit und Zuverlässigkeit der in Abschnitt 4.2 vorgestellten Messmethode zur Bestimmung der Partikelkonzentration in einem Abgas zu überprüfen wurden Parallelmessungen mit der in Abschnitt 3.1 gezeigten Standardmessmethode mit aussenliegendem Quarzwatte-Filter (Koneth-Verfahren) durchgeführt.

Es wurden 3 Parallelmessungen à je 30 Minuten im Reingas, also nach dem RPS, vorgenommen. Die Resultate sind in Tabelle 4.1 zusammengestellt.

Tabelle 4.1: Vergleich zwischen der in Abschnitt 4.2 vorgestellten Messmethode mit dem Staubmessgerät FH62 und dem Standardmessverfahren nach Koneth anhand von parallel gemessenen Partikelkonzentrationen im Abgas einer Holzfeuerung nach RPS.

Messung	Partikelkonzentration nach Koneth [mg/Nm ³]:	Partikelkonzentration nach FH62 E [mg/Nm ³]:	Abweichung FH62 gegenüber Koneth [%]:
1	362	329	-9.3
2	278	251	-9.7
3	287	267	-6.8

Die Abweichungen zwischen den beiden Messmethoden lagen stets unter 10%. Unter Berücksichtigung der Messgenauigkeit der Standardmethode von $\pm 15\%$ gemäss [BUWAL] stimmen die Messungen gut überein.

4.4 Resultate

In Tabelle 4.2 sind die Messresultate für verschiedene Betriebspunkte zusammengestellt. Jedem Messpunkt liegen 6 bis 8 Messwerte zugrunde, so dass für die verschiedenen Messgrössen Mittelwert und Standardabweichung angegeben werden konnte. Die einzelnen Messwerte wurden über jeweils 8 Minuten gemessen (Tabelle 4.2).

Tabelle 4.2: Gemessene Partikelgehalte in Roh- und Reingas sowie mittlerer Abscheidegrad des RPS bei verschiedenen Holzarten (Brennstoff), RPS-Drehzahlen, RPS-Widerstandsbeiwerten (Mass für die RPS-Verschmutzung) und Rohgasvolumenströmen. Die Partikelgehalte sind entsprechend den zugehörigen Grenzwertbestimmungen auf 13% O₂ bezogen.

Holzart	RPS-Drehzahl [Hz]	Widerstandsbeiwert RPS [-]	Volumenstrom Rohgas [Bm ³ /h]	Partikelgehalt Rohgas [mg/Nm ³]	Partikelgehalt Reingas [mg/Nm ³]	Mittlerer Abscheidegrad [%]
Palettholz	50	14.1 ± 0.8	1869 ± 34	366 ± 49	247 ± 44	32.6
Palettholz	35	17.9 ± 1.8	2057 ± 32	388 ± 81	363 ± 33	6.6
Palettholz	60	21.3 ± 2.0	2030 ± 33	462 ± 72	413 ± 32	10.6
Palettholz	50	25.7 ± 2.8	2026 ± 25	465 ± 73	408 ± 35	12.1
Palettholz	50	19.2 ± 0.3	2406 ± 30	833 ± 68	624 ± 124	25.1
Fichte	50	19.6 ± 1.8	1299 ± 32	122 ± 13	119 ± 14	2.6
Fichte	50	17.1 ± 1.1	2423 ± 41	704 ± 176	407 ± 94	42.2
Fichte	50	16.7 ± 0.3	1992 ± 36	415 ± 50	349 ± 74	15.7
Fichte	50	15.1 ± 0.3	2037 ± 26	506 ± 305	338 ± 33	33.3
Fichte	50	16.6 ± 1.0	2056 ± 24	396 ± 88	325 ± 40	18.0
Pappel	50	15.3 ± 0.4	2471 ± 63	1014 ± 469	632 ± 224	37.7
Pappel	50	19.1 ± 1.2	1643 ± 82	530 ± 167	273 ± 67	48.5

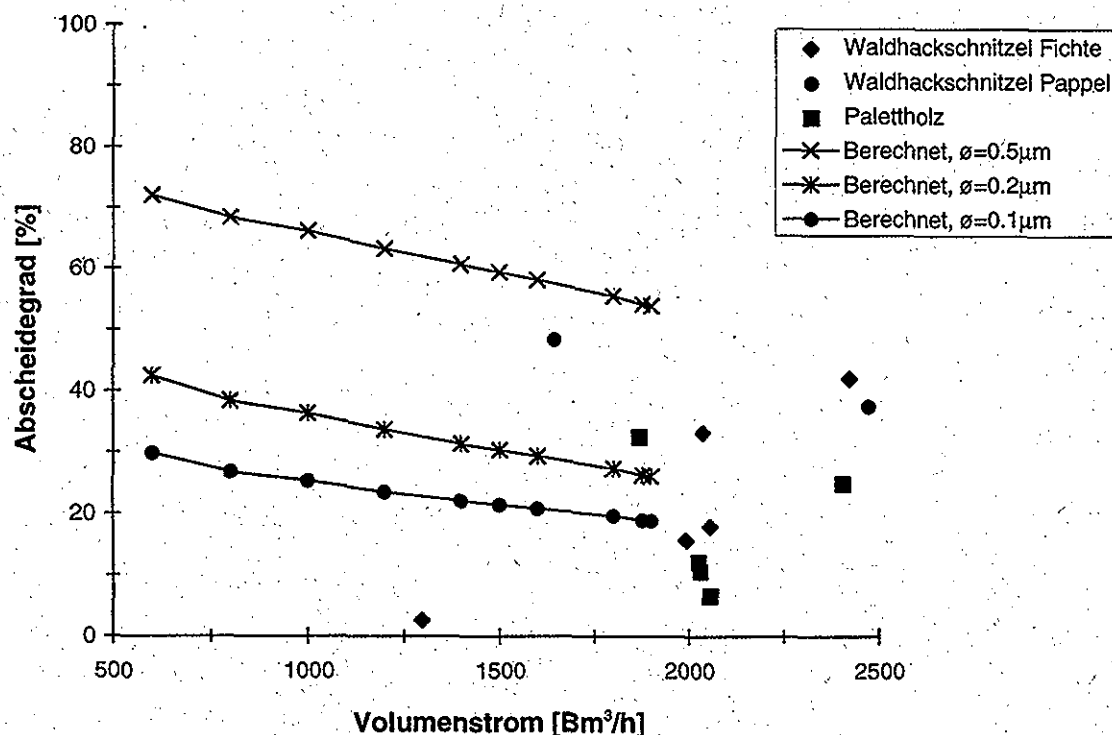


Abbildung 4.0: Vergleich der gemessenen RPS-Abscheidegrade mit den berechneten Werten nach Brouwers für monomodale Rohgas-Partikelgrößenverteilungen. (normalverteilt mit einer Streuung von 2.5) bei unterschiedlichen mittleren Partikeldurchmessern.

Mit einer Ausnahme lagen die Partikelgehalte im Reingas aller ausgemessenen Betriebspunkte zwischen 240 mg/Nm^3 und 640 mg/Nm^3 . Diese Werte sind deutlich über dem angestrebten Partikelgehalt von 50 mg/Nm^3 und sogar über dem aktuellen Grenzwert von 150 mg/Nm^3 . Lediglich in einem Betriebspunkt bei geringem Volumenstrom (Teillast der Feuerung) konnten 119 mg/Nm^3 erreicht werden, wobei allerdings der Partikelgehalt im Rohgas bereits ähnliche Werte aufwies. (Tabelle 4.2) Analog zu Abschnitt 3.3 wurden die gemessenen Abscheidegrade mit den nach Brouwers berechneten Werten verglichen (Abbildung 4.3).

Der Abscheidegrad des RPS lag je nach Betriebspunkt zwischen 2% und 50% (Tabelle 4.2, Abbildung 4.3).

4.5 Diskussion

Die in der ersten Versuchsreihe erreichten Reingasgehalte konnten in dieser zweiten Versuchsreihe nicht annähernd erreicht werden, was in der folgenden Abbildung 4.4 verdeutlicht wird. Lagen z.B. die Abscheidegrade bei Rohgas-Volumenströmen zwischen 1500 und 2000 Bm^3/h bei der ersten Versuchsreihe zwischen 70% und 90%, so waren es bei der zweiten Versuchsreihe lediglich noch zwischen 16% und 49%.

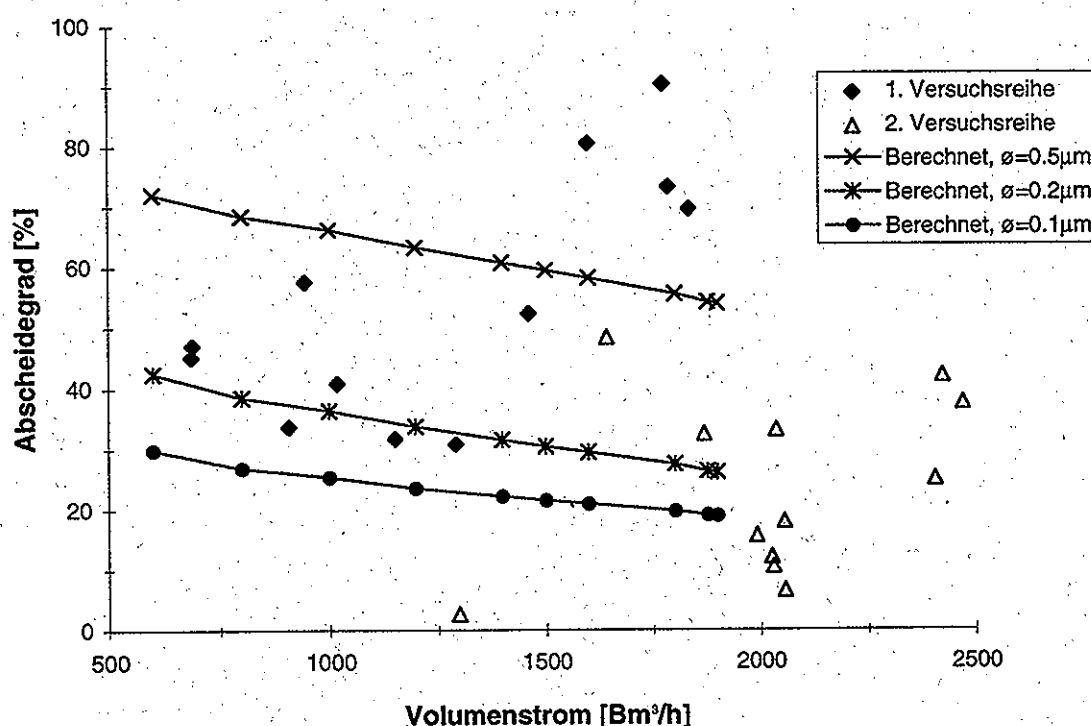


Abbildung 4.4: Vergleich der Abscheidegrade der ersten Versuchsreihe (Abschnitt 3) und der zweiten Versuchsreihe (Abschnitt 4) in Abhängigkeit des Volumenstroms. Die erste Versuchsreihe zeigt bei ähnlichen Volumenströmen höhere Abscheidegrade als die zweite.

Die Widerstandsbeiwerte sind im Vergleich zum maximalen Widerstandsbeiwert nach Brouwers von etwa 3 sehr hoch, nämlich zwischen 4 bis 9 Mal höher. Dies deutet darauf hin, dass das RPS während dieser Versuchsreihe relativ stark verschmutzt war, wobei die Verschmutzung grösstenteils aus Komponenten bestand, welche mit der RPS-Abreinigung nicht entfernt werden konnte, denn auch nach mehrmaligem abreinigen konnten keine tieferen Widerstandsbeiwerte erreicht werden. Nach der letzten Messung mit Pappelholz war der RPS so stark verschmutzt, dass der benötigte Abgasvolumenstrom nicht mehr gefördert werden konnte. Etwa 90% der Filterkanäle waren von blossen Auge betrachtet durch Partikelablagerungen verschlossen. Bei näherer Betrachtung zeigte sich, dass diese Partikelablagerungen eine poröse Struktur aufwiesen und die Kanäle für Gase somit doch z.T. durchströmbar waren.

Aufgrund der oben erwähnten Verschmutzungsanzeichen ist davon auszugehen, dass die Reingasgehalte im Vergleich zu der ersten Versuchsreihe deshalb wesentlich höher waren, weil der RPS stark und im Betrieb irreversibel verschmutzt war. Bei hohem Verschmutzungsgrad sinkt der Abscheidegrad deutlich. Dies ist plausibel, da die Geschwindigkeiten in den nicht verstopften Filterkanälen höher und die Verweilzeiten somit kürzer sind.

Die im Vergleich zu den Untersuchungen von [Hasler und Nussbaumer, 1997] über die Partikelgrössenverteilung bei Holzfeuerungen deutlich höheren Rohgasgehalte deuten wie bereits erwähnt darauf hin, dass hier auch grössere Partikel mit dem Abgasstrom mitgeführt wurden. Unter diesem Aspekt wären nach den Berechnungen gemäss Brouwers auch wesentlich höhere Abscheidegrade zu erwarten als in der vorliegenden Messreihe erreicht wurden (Abbildung 4.3). Tatsächlich wurden in der ersten Messreihe bei geringerem Verschmutzungsgrad Abscheidegrade bis zu 90% gemessen.

5 Ansätze zur Optimierung des RPS

Die in Abschnitt 3 und 4 dargestellten Untersuchungen haben verschiedene Problemkreise des RPS für die Anwendung bei Holzfeuerungen aufgezeigt. Im folgenden sind mögliche Optimierungsansätze zusammengestellt.

5.1 Filterabreinigung

Hauptproblem bei der Anwendung des RPS zur Partikelfiltration bei Holzfeuerungsabgasen liegt in der Abreinigung des rotierenden Filterelementes. Da die Hafteigenschaften der Aerosole in Holzfeuerungsabgasen je nach Vorgeschichte, d.h. je nach Holzart und Verbrennungsbedingungen sowie je nach Abgastemperatur zum Teil sehr gut sind, ist es äusserst schwierig, die im Filterelement abgeschiedenen Komponenten wieder abzureinigen. Die hervorragende Haftung der Partikel kann durch die hohen Aufprallgeschwindigkeiten verbessert werden (führt zu grossen Kontaktflächen), so dass vor allem in den ersten Millimetern der Filterkanäle grosse, bleibende Ablagerungen entstehen können. Diese Ablagerungen führen zu Veränderungen der Geschwindigkeitsverteilung durch das Filterelement: Durch einen kleinen Anteil der Kanäle fliesst der grösste Teil des Abgasstroms, wodurch in diesen Kanälen die Geschwindigkeiten sehr hoch und damit die Verweilzeiten sehr kurz werden; was zu einer Minderung der Abscheideleistung führt. Dies wird durch die durchgeführten Messungen bestätigt, ist doch die Abscheideleistung bei gering verschmutztem RPS wesentlich höher als bei stark verschmutztem RPS (Abschnitt 4.5).

Weiter führen die Verschmutzungen in den Filterkanälen zu einem erhöhten Druckverlust über dem RPS, was einerseits zu einer grösseren notwendigen Ventilatorleistung führt, andererseits den Leckagestrom entlang des rotierenden Filterelementes (von Rohgasseite auf Reingasseite) erhöht. Die Druckluftdüse zur Filterabreinigung wird radial von aussen nach innen über das Filterelement geführt. Aufgrund der Rotationsbewegung des Filterelementes können so alle Kanäle nach und nach abgereinigt werden. Entscheidend ist, dass die Armbewegung der Druckluftdüse so langsam ist, dass alle Filterkanäle abgereinigt werden. Die Bedingung lautet:

$$v \leq l \cdot z \quad (\text{Gl. 5.1})$$

mit: v	Geschwindigkeit des Abreinigungsarms
l	Länge der Druckluftdüse
z	Drehzahl des Filterelementes

Die Armgeschwindigkeit muss zwar so klein sein, dass die Gleichung 6.1 erfüllt wird; ansonsten sollte sie aber möglichst gross sein, da ein zweites Ausblasen von Kanälen während der gleichen Armbewegung nur einen geringfügigen Abreinigungseffekt bewirkt und die benötigte Druckluft somit nicht effizient eingesetzt wird. Um eine insgesamt bessere Abreinigung zu erreichen ist es deshalb geeigneter, die Abreinigungszyklen, also die Intervalle zwischen den Abreinigungen, zu vermindern. Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung der Abreinigung ist die Verlängerung der einzelnen Druckstösse durch die Kanäle, indem die RPS-Drehzahl zur Abreinigung gesenkt wird. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Gleichung 6.1 auch bei abgesenkter Drehzahl zu erfüllen ist, was eine gleichzeitige Minderung der Armbewegung impliziert.

Die grossen, mit der Druckluftabreinigung nicht entfernbar Ablagerungen entstehen jeweils im Kanaleintrittsbereich, d.h. auf den ersten Millimetern der Abscheiderkanäle. Ein weiterer Ansatz zur Verbesserung der Abreinigung ist somit die Senkung der Hafteigenschaften der Kanaloberfläche auf den ersten Millimetern, z.B. durch eine Antihafbeschichtung.

5.2 Vorabscheider

Die Partikelkonzentrationen von einigen 100 mg/Nm^3 deuten darauf hin, dass neben den Submikronpartikeln auch Partikel im Mikrometerbereich vorhanden sind. Es ist somit möglich, mit einem im RPS integrierten Zyklon als Vorabscheider die Belastung des RPS-Filterelements zu vermindern. Dieses System RPS/Zyklon wurde bereits für andere Anwendungen erfolgreich eingesetzt [Brouwers, 1996]. Durch die geringere Filterbelastung bei vorgeschaltetem Zyklon wird auch die Abreinigungsproblematik etwas entschärft (Abschnitt 5.1).

Durch die Anordnung des Zyklons unterhalb des rotierenden Filterelements kann der Partikelaustrag des Zyklons für den RPS mitverwendet werden. Die diffizilere und nicht detailliert ausgetestete, vorliegende Version des seitlichen Partikelaustrags (Abschnitt 5.3) ist somit nicht mehr notwendig.

Nachteil des Einsatzes eines integrierten Zyklons ist, dass die Möglichkeit der Parallelschaltung mehrerer übereinander angeordneter RPS eingeschränkt wird.

5.3 Partikelaustrag

Der verwendete Partikelaustrag mit Staubsammelbehälter war seitlich, also radial am RPS angeordnet (Abbildung 2.1). Durch die Abreinigung (Abschnitt 5.1) werden die Partikel bzw. die Partikelagglomerate aus dem rotierenden Filterelement ausgeblasen und aufgrund ihrer tangentialen Geschwindigkeit (entstanden durch die Rotation) an die RPS-Aussenwand transportiert, wo sie von der rotierenden Strömung zur Austragstelle transportiert werden und so in den Staubsammelbehälter gelangen. Je nach Trägheit erreichen die Partikel die Aussenwand früher oder später. Der Partikelaustrag sollte so angeordnet werden, dass auch der Grossteil der kleineren Partikelagglomerate vor der Austragstelle an die Wand transportiert werden und nicht eine Strömungsumdrehung im Abgas mitmachen müssen, bis sie ausgetragen werden können.

Insbesondere sollte der Austrag nicht dort angeordnet werden, wo die meisten Aufprallstellen von Partikelagglomeraten auf der Aussenwand sichtbar sind, da dann eben gerade die kleineren Agglomerate eine Umdrehung mitströmen müssen und die Austragwahrscheinlichkeit somit vermindert wird. Hinzu kommt, dass hauptsächlich die Auftreffstellen der grösseren Agglomerate an der Aussenwand sichtbar sind.

Es ist nicht zu erwarten, dass alle aus dem Filterelement ausgeblasenen Partikelagglomerate den Partikelaustrag erreichen. Die Version mit axialem Partikelaustrag mit Zyklon (Abschnitt 5.2) lässt eine höhere Austragwahrscheinlichkeit erwarten.

5.4 Verhinderung Leakagestrom vom Rohgas zum Reingas

Entlang des rotierenden Filterelementes kann ein Leakagestrom vom Rohgas ins Reingas entstehen. Das Rohgas kann so ungereinigt ins Reingas gelangen und den Gesamtabscheidegrad des RPS wesentlich herabsetzen. Verschiedene Komponenten zur Verhinderung eines solchen Leakagestroms sind denkbar.

In der ausgemessenen Version wurde das Reingas durch eine Lamellendichtung vom Rohgas getrennt. Da stets eine Unwucht am rotierenden Filterelement vorhanden ist, muss der Dichtungsabstand einige Millimeter betragen. Wie gross der übrigbleibende Leakagestrom zwischen Rohgas und Reingas in dieser Ausführung ist, wurde bis jetzt nicht untersucht. Bei grösseren Verschmutzungsgraden des RPS und damit grösseren Druckverlusten über dem RPS kann nicht ausgeschlossen werden, dass ein beträchtlicher Leakagestrom entsteht.

Die effizienteste Variante zur Verhinderung des Leakagestroms ist das Anbringen eines Ventilators im Reingasbereich nahe dem Filterelement, welcher eine Verdichtung des Abgases auf der Reingasseite bewirkt, so dass der Druck dort höher ist als auf der Rohgasseite. Dadurch entsteht ein Volumenstrom von der Reingasseite zur Rohgasseite, so dass ein Rückströmen von der Rohgasseite

Richtung Reingasseite verhindert wird. Diese Variante wurde von Brouwers [1995, 1996] bereits für verschiedene Anwendungen ausgetestet.

Eine weitere Möglichkeit ist das Anbringen eines Laufrades direkt auf dem Filterelement, welches einen drehenden Gasring erzeugt, der vom umgebenden Gas nur schlecht passiert werden kann.

5.5 Temperaturabsenkung

Der RPS sollte so positioniert werden, dass sich der Abgasstrom auf einem tiefen Temperaturniveau befindet. Daraus resultieren die folgenden zwei Hauptvorteile: Zum einen wird das Abgasvolumen bei sinkender Temperatur geringer, was zu kleineren Geschwindigkeiten durch das Filterelement und damit zu einer längeren Verweilzeit führt. Zum anderen wachsen die Partikel mit sinkender Temperatur durch Anlagerungen aus der Gasphase [Steiner 1993], was ebenfalls zu einem höheren Abscheidegrad führt. Diese Zusammenhänge sollten bei der Konzeptionierung der Gesamtanlage berücksichtigt werden.

6 Literatur

- Brouwers, J.: Secondary Flows and Particle Centrifugation in Slightly Tilted Rotating Pipes, *Appl. Sci. Res.* 55, 95-105, 1995
- Brouwers, J.: Rotational Particulate Separator: A New Method for Separating Fine Particulates and Mists from Gases, *Chem. Eng. Technol.* 19, 1-10, 1996
- BUWAL: *Empfehlungen über die Emissionsmessung von Luftfremdstoffen bei stationären Anlagen*, Bern 1996
- Hasler, P.; Nussbaumer, T.: *Partikelgrößenverteilung bei der Verbrennung und Vergasung von Biomasse*, Bundesamt für Energie, Bern 1997
- Hüglin, C.: *New Applications of Aerosol Photoemission: Characterisation of Wood Combustion Particles and Time Resolved Thermal Desorption Studies*. Diss. ETH Nr. 11975, Zürich 1996
- Steiner, D.: *Physik der Verbrennungspartikel*, Diss. ETH Nr. 10191, Zürich 1993, 33-48