

Wirksamkeit neuer Abscheidetechniken in Holzfeuerungsabgasen bezüglich Feinpartikeln

Praxiserhebung zur Wirkung von Sekundärmaßnahmen auf die Staubemissionen von Holzfeuerungen unter spezieller Berücksichtigung des Feinpartikelausstosses

Projekt 44068 Vertrag 85295

Ausgearbeitet durch

Christian Gaegauf, Ökozentrum Langenbruck
Martin Schmid, Ökozentrum Langenbruck
Andres Jenni, Ardens GmbH

Im Auftrag von

Bundesamt für Energie
Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft

Schlussbericht Juli 2003

ISBN

Auftraggeber

Bundesamt für Energie
Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft

Auftragnehmer

Ökozentrum Langenbruck, 4438 Langenbruck
ardens GmbH, 4410 Liestal

Autoren

Ökozentrum Langenbruck:
Christian Gaegauf, dipl. Ing. ETH/SIA, gaegauf@oekozentrum.ch
Martin Schmid, dipl. Ing. FH, schmid@oekozentrum.ch

Ardens GmbH:
Andres Jenni

Begleitgruppe

Daniel Binggeli, Bundesamt für Energie, 3003 Bern
Ulrich Jansen, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, 3003 Bern

Dieses Dokument ist im Auftrag des Bundesamtes für Energie und des Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft erarbeitet worden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind alleine die Autoren verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE

Worblentalstrasse 32, CH-3063 Ittigen • Postadresse: CH-3003 Bern
Tel. 031 322 56 11, Fax 031 323 25 00 • office@bfe.admin.ch • www.admin.ch/bfe

Vertrieb

ENET, Egnacherstrasse 69 · CH-9320 Arbon
Tel. 071 440 02 55 · Tel. 071 312 05 55 · Fax 071 440 02 56
enet@temas.ch · www.energieforschung.ch · www.energie-schweiz.ch

Inhaltsverzeichnis

Abstract	1
Zusammenfassung.....	3
1 Einleitung	5
1.1 Ausgangslage	5
1.2 Projektziel	5
2 Staub- und Partikelanalytik	6
2.1 Gesamtstaubmessung	6
2.2 Feinpartikelmessung.....	6
2.3 Gasanalyse und Temperaturmessung	8
2.4 Messdatenauswertung.....	10
3 Untersuchte Anlagen	11
4 Messresultate	12
4.1 Darstellung der Resultate	12
4.2 Brennstoffkennzahlen.....	12
4.3 Abgaskondensationssysteme.....	13
4.4 Anlagen mit Elektrofilter.....	15
4.5 Anlagen mit Gewebefilter.....	17
5 Diskussion.....	19
5.1 Abscheidewirkung.....	19
5.2 Filtereffizienz.....	23
5.3 Spezifische Daten zu den Elektrofiltersystemen	25
5.4 Reingasemissionen und LRV-Grenzwerte	26
5.5 Energiebedarf.....	28
5.6 Vergleich der Partikelemissionen von Holz-, Gas- und Oelfeuerungen.....	31
6 Betriebswirtschaftliche Aspekte	32
6.1 Datenerhebung.....	32
6.2 Berechnung der spezifischen Filterkosten	32
6.3 Hilfsenergiokosten	32
6.4 Spezifische Filterkosten	33
6.5 Betriebssicherheit.....	36
7 Beurteilung des Einsatzgebietes.....	37
7.1 Abgaskondensationsanlage.....	37
7.2 Elektrofilter	37
7.3 Gewebefilter	37
8 Schlussfolgerungen	39
Literatur.....	41
Danksagung	42
Anhang.....	43

Abstract

Efficiency of Various Filter Systems Particularly for Nanoparticle Removal for Wood Boiler Flue Gas

C.K. Gaegauf, M. Schmid, Centre of Appropriate Technology and Social Ecology, CH-4438 Langenbruck, Switzerland

A. Jenni, ardens GmbH, CH-4410 Liestal, Switzerland

Wood combustion processes produce smoke emissions, which are of concern to authorities and the public. Recent European studies claim airborne particulate matter (PM) smaller than 10 μm (PM10) as major respiratory irritants (*Air pollution and Health*, EC-APHEA I and II). The Swiss Federal Environmental Protection Agency (BUWAL) requires emission factors on PM pollutants of various sources in order to establish strategies for aerosol abatement. The work carried out by the *Center of Appropriate Technology and Social Ecology* covered the investigations of typical wood fuel combustion systems in the field under real world conditions. This to cope with the lack of quantified PM emission factors and characterization in terms of particle number and size distribution. The goal of these investigations was to determine the filter efficiency related to PM0.6 and *Total Particle Emissions* (TPE) of different flue gas treatment systems for wood chip boilers in the range of 0.6 to 2.5 MW heat output.

Two analytical methods were applied to monitor PM emissions. A *Scanning Mobility Particle Sizer* (SMPS) was utilized to determine nanoparticle numbers and size distribution in wood combustion stack gases with a mobility diameter between 0.012 μm to 0.6 μm (PM0.6). Total particle emissions (TPE) were measured simultaneously based on gravimetric filter method to compare TPE with the particle number concentration (NC) of PM0.6.

Seven different wood combustion systems were tested applying three different systems for exhaust gas treatment. All seven systems comprised automatically fed wood-chips boilers burning either wood from forest or waste wood. The two heating plants burning green wood were equipped with an exhaust gas condensation system, which aim was primarily to recuperate the latent energy of water vapor in the flue gases.

The electro-static precipitators as well as the fabric-filter systems showed very high filter-efficiency of 99.6 % and 99.99 % respectively, while the particle removal efficiency was below 50 % for the exhaust gas condensation systems. The later was designed to burn green wood from the forest with high water content. The other two systems were designed to burn waste wood with some fractions of paper. Referring to the total particle emission, all seven tested systems had emission levels 3 to 30-fold below the respective threshold value of the Swiss clean air act (CH-LRV). Electro-static precipitators and fabric-filter remove the fine particle < 600 nm even more efficiently than TPE. The high separation effect is assumed to occur due to coagulation mechanisms of nanoparticles in the filter. Particle number concentrations (NC) and total particle emission (TPE) correlate in the TPE-range beyond 5 mg/MJ below this TPE-value there is now correlation. The MODE-diameter of the particle size increased slightly after all filter systems to a value of 120 nanometers. The MODE-diameter defines the class of the particle size with highest particle number concentration.

When fabric-filter systems and electro-static precipitators are compared according the related overall costs, fabric-filter systems turned out to be more economic below 2 MW of boiler heat output, while electro-static precipitators are more cost-efficient for larger boilers. The exhaust-condensation systems are relatively low in costs at all boiler heat output levels. Although fabric-filter systems require more restrictions to the quality of the exhaust gases such as avoidance of flying braise (risk of ignition) or humidity (plugging of fabric), the two tested fabric-filter systems run with fewer interruptions compared to the electro-static precipitators.

Keywords: wood combustion, biomass, particulate matter, emission factor, field measurement, fossil fuel, filter efficiency, fabric filter, electro-static precipitator, exhaust condensation systems

Zusammenfassung

Bei der Verbrennung von Holz entstehen Partikel, die mit den Abgasen in die Umwelt gelangen. Europäische Studien zeigen, dass Staubpartikel in der Atmosphäre unerwünscht sind (*Air pollution and Health, EC-APHEA I and II*). Vor allem Feinpartikel unter 10 µm Durchmesser (Particulate Matter, PM10) können die Atemwege belasten. In Regionen mit hoher Schadstoffbelastung (Massnahmengebiete) müssen von den Behörden spezielle Vorkehrungen zur Eindämmung der Schadstoffe angeordnet werden. Um solche Massnahmen wirksam treffen zu können, ist es für die Behörde wichtig, die Emissionen der verschiedenen Schadstoffquellen zu kennen. Die Bundesämter für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) und Energie (BFE) beauftragten das Ökozentrum Langenbruck mit der Ermittlung der Staubemissionsfaktoren von Holzfeuerungen im Praxisbetrieb, die mit Filtersystemen ausgerüstet sind. In Ergänzung zu den Messung des Gesamtstaubes (Total Particle Emissions, TPE) mit den gängigen gravimetrischen Filtermethoden in Roh- und Reingas wurde parallel der Ausstoss von Feinpartikeln untersucht. Mit dem verwendeten SMPS-Feinpartikelanalysegerät konnten die Anzahl und die Grössenverteilung von Partikeln mit Mobilitätsdurchmessern zwischen 0.012 µm und 0.6 µm (PM0.6) erfasst werden.

Die Messkampagne erfolgte an sieben automatischen Holzfeuerungsanlagen im Leistungsbereich zwischen 0.6 und 2.5 MW mit unterschiedlichen Abscheidetechniken. Fünf Feuerungen waren mit Elektro- oder Gewebefilter ausgerüstet. In zwei der untersuchten Anlagen, die nicht mit eigentlichen Filteranlagen ausgerüstet waren, interessierte der Auswaschungsgrad der Abgaskondensationsanlagen bezüglich Staub. Als Brennstoff kamen trockene und waldfrische Hackschnitzel sowie Abfallholz/Kartonmischungen zum Einsatz.

Die Elektro- und Gewebefilter erzielten Abscheidegrade zwischen 99.6 % und 99.99 %. Der Staubrückhalt der Abgaskondensationsanlagen lag um 50 %. Die Emissionsfaktoren für Staub bewegen sich bei Elektrofiltern zwischen 1.1 mg/MJ (entsprechend 1.6 mg/m³ @ 11 % O₂) und 6.4 mg/MJ (11.7 mg/m³ @ 11 % O₂), bei Gewebefilter zwischen 2.1 mg/MJ (3.7 mg/m³ @ 11 % O₂) und 3.9 mg/MJ (7.4 mg/m³ @ 11 % O₂) und bei Abgaskondensationsanlagen zwischen 19.6 mg/MJ (34 mg/m³ @ 11 % O₂) und 50 mg/MJ (69 mg/m³ @ 13 % O₂). Sämtliche Staubwerte der Anlagen liegen um das 3 bis 30-fache unter den Grenzwerten der Schweizer Luftreinhalte-Verordnung (CH-LRV). Elektro- und Gewebefilter reduzieren die Partikelanzahlkonzentrationen im physiologisch relevanten Grössenbereich von < 600 nm (PM0.6) noch wirksamer als den Gesamtstaub. Dieser Sachverhalt lässt sich mit der Agglomerationswirkung durch Koagulation von kleinsten Partikeln erklären. Stellt man die in früheren Untersuchen ermittelten Feinpartikelwerte von Gas- und Ölfeuerungen den in der vorliegenden Untersuchung gemessenen Werten gegenüber, zeigt sich, dass die Feinpartikelemissionen von Holzfeuerungen mit Abgasfiltersystemen und die von Gas- und Ölfeuerungen in der gleichen Grössenordnungen liegen.

Partikelanzahl (NC) und Gesamtstaubauswurf (TPE) korrelieren bei TPE-Emissionsfaktoren über 5 mg/MJ, darunter findet sich keine Korrelation mehr. Die Partikeldurchmesser mit der grössten Partikelanzahl (MODE-Durchmesser) nehmen bei allen Anlagen durch die Abgasnachbehandlung auf 120 nm zu. Der MODE-Durchmesser im Rohgas variiert stärker. Er bewegt sich zwischen 60 nm und 120 nm.

Gewebefilteranlagen weisen bei Anlagen unter 2 MW etwas geringere Betriebskosten auf als Elektrofilteranlagen. Dies ist vor allem auf den hohen Platzbedarf der Elektrofilter zurückzuführen. Über 2 MW Kesselleistung sind Elektrofilter die kostengünstigere Variante. Abgaskondensationsanlagen verzeichnen günstige Betriebskosten bei allerdings geringerer Staubabscheidewirkung. Durch die Abgaskondensation erhöhte sich der Jahresnutzungsgrad um 11 bis 20 %.

Die Gewebefilteranlagen erreichen trotz erhöhten Anforderung an die Rohgase was Funkenflug und Feuchtigkeit anbetrifft eine gute Verfügbarkeit. Die drei untersuchten Elektrofilteranlagen hatten während der Messungen Betriebsstörungen zu verzeichnen.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Neueste Ergebnisse der europäischen Studie über die Auswirkungen der Luftverschmutzung auf die Gesundheit *Air Pollution and Health* (EC-APHEA I und II), zeigen, dass Feinstaub im Mikron- und Submikronbereich (Partikeldurchmesser $dp < 10$ Mikron, PM10) zu den markantesten Schadstoffen in der Atemluft zählt. Um griffige Massnahmen zur Reduktion von Feinstäuben treffen zu können, ist es erforderlich, die verschiedenen Feinpartikelquellen zu quantifizieren.

Zur Zeit befassen sich verschiedene Forschungsprojekte mit Feinpartikelemissionen aus dem Strassen- und Schienenverkehr, da diese einen Anteil von etwa 36 % der PM10-Luftbelastung /1, /2/ verantworten. Bei der Verbrennung von Holz entstehen auch Feinpartikel. Allerdings beläuft sich der Anteil der Partikelemissionen von Heizungsanlagen je nach Schätzung nur auf insgesamt etwa 2 bis 5 % der gesamten PM10-Belastung /3/. Davon macht der Anteil der Partikelemissionen aus Holzfeuerungen wiederum etwa die Hälfte aus. Um in Luftqualitätskatastern die einzelnen Schadstoffquellen zuteilen zu können, sind die Kenntnisse der Partikelemissionen im Mikron- und Submikronbereich von Holzfeuerungen Voraussetzung. Praxiserhebungen liefern das entsprechende Datenmaterial.

Das Ökozentrum Langenbruck hat in seinem *Labor für erneuerbare Energiesysteme* in Kooperation mit der ETH Zürich und den Fachhochschulen Aargau und Bern eine Infrastruktur zur ambulanten Erfassung der Feinpartikel in Holzfeuerungsabgasen aufgebaut. Damit können der Gesamtstaub (Total Particle Emission, TPE) und die Partikel nach Anzahl und Größenverteilung in den Abgasen analysiert werden. Die TPE-Staubmessung basierte auf gravimetrischen Filtermessungen. Die Messung der Feinpartikelfraktion zwischen 0.01 und 0.6 μm basierte auf der Mobilitätsanalyse mit DMA (Differential Mobility Analyzer) und CPC (Condensation Particle Counter) Analytik und SMPS Software (Scanning Mobility Particle Sizer).

1.2 Projektziel

Mit den Untersuchungen galt es die Wirksamkeit verschiedener moderner Abscheidetechniken bezüglich Rückhalt von Feinpartikeln zu analysieren. Es wurden drei grundsätzlich unterschiedliche Abscheideverfahren untersucht. Der Schwerpunkt lag auf der Messung der *Partikelgrößenverteilung* und *Partikelanzahl* der Feinpartikelfraktionen im Rohgas und nach den Abscheidern mit einem Mobilitätsdurchmesser unter 600 nm. Ausgewertet werden die verschiedenen Abscheideverfahren bezüglich ihrer Wirksamkeit im Bereich der Feinpartikel im Vergleich zum Gesamtstaub.

Die Anlagenbetreiber sollten ferner über den Unterhaltsaufwand, Störanfälligkeit, Hilfsenergieeinsatz und die Kosten der verwendeten Filtersysteme befragt werden. Anhand der Angaben sollten der Betriebsaufwand und die Betriebskosten für die Reduktion des Staub- und Partikelauswurfs bewertet werden.

Mit den ermittelten Emissionsdaten lassen sich die Quellenanteile an Feinpartikeln von Holzfeuerungen mit Filteranlagen hochrechnen.

2 Staub- und Partikelanalytik

Das Messverfahren für die ambulanten Partikelmessungen wurde bereits im Rahmen von vorangegangenen Forschungsvorhaben eingesetzt /8/.

2.1 Gesamtstaubmessung

Für die gravimetrische Gesamtstaubmessung (Total Particle Emission, TPE) gelangten Inline-Abscheide-systeme mit Planfilter in Anlehnung an das US/EPA-Messverfahren /7/ zum Einsatz.

Die Abgasentnahme für die Gesamtstaubmessung erfolgte über eine Absaugsonde im Abgasrohr mit einem 90° gekrümmten Chromstahlrohr mit auswechselbaren Düsen aus Aluminium. Mit den verschiedenen Absaugdüsen konnte die isokinetische Probenahme mit dem erforderlichen Absaugvolumen für eine genügende Staubmenge abgestimmt werden. Das Filterhaltersystem bestand aus zwei verschraubbaren Chromstahlgehäusen, die über ein Chromstahlrohr miteinander verbunden sind. Eine Beheizung hielt das Filterhaltersystem auf 120°C ($\pm 15^\circ\text{C}$). Für die Messungen wurden Flachfilter (Pall, T60A20) verwendet. Je nach Grösse und Zugänglichkeit des Abgasrohres und der Abgastemperatur wurden die Filterhalter mit Ansaugkrümmer direkt in den heissen Gasstrom montiert, oder aber es kamen zusätzlich zum beheizten Filterhalter noch beheizte Ansaugkrümmer zum Einsatz. Die maximalen Temperaturen im Filtersystem lag bei Erwärmung durch den Abgasstrom bei bis zu 220°C.



Abbildung 1 Isokinetische Probenannahme: oben beheizter Krümmer und beheizter Flachfilterhalter, unten die unbeheizte Variante. Rechts der Normflansch (EMPA-Standard) mit den weiteren Durchführungen für die Gasanalyse und das SMPS-System.

2.2 Feinpartikelmessung

Mit der SMPS-Messausstattung (scanning mobility particle sizer, TSI, 3936 Series) wurden Partikelkonzentrationen in 114 Grössenklassen von 12 bis 532 nm bestimmt. Ein mechanischer Impaktor mit 50% Abscheidecharakteristik bei 650 nm separierte die groben Staubpartikel. Da die so erfassbaren Partikel kleiner als 600nm sind, werden sie in den folgenden Ausführung abgekürzt mit PM0.6 bezeichnet.

Die Partikel im Probegas wurden danach mit einer radioaktiven Quelle bipolar ionisiert und im DMA (differential mobility analyzer, TSI 3080) in einem konstanten Luftstrom auf Grund eines variablen elektrischen Feldes nach ihrer Massenmobilität selektiert. Zum Nachweis und Zählen der selektierten Partikel wurden diese in einer gesättigten Alkoholatmosphäre durch Kondensation vergrößert und im CPC (condensation particle counter, TSI 3010) optisch erfasst. Die Partikel wurden als Funktion des jeweiligen elektrischen Feldes, das auf Grund der Massenmobilität die Kanalbreite respektive den mittleren Partikeldurchmesser bestimmte, gezählt. Die Summe aller gezählten Partikel über den ganzen Messbereich entsprach demnach der Gesamt-Anzahlkonzentration (total number concentration, TNC). Die Steuerung von DMA und CPC erfolgte mit der SMPS-Software (TSI, V. 3.2). Der Messdurchgang (Scan) für eine Partikelgrößenverteilungsanalyse dauerte minimal 2 Minuten. Aus statistischen Gründen ist eine Scanzeit von $2^{1/2}$ Minuten gewählt worden. Zur statistischen Abstützung der Daten wurden jeweils drei Messungen (Samples) à 10 Scans pro Parameter aufgezeichnet. Ausnahmen werden im Bericht speziell erwähnt.

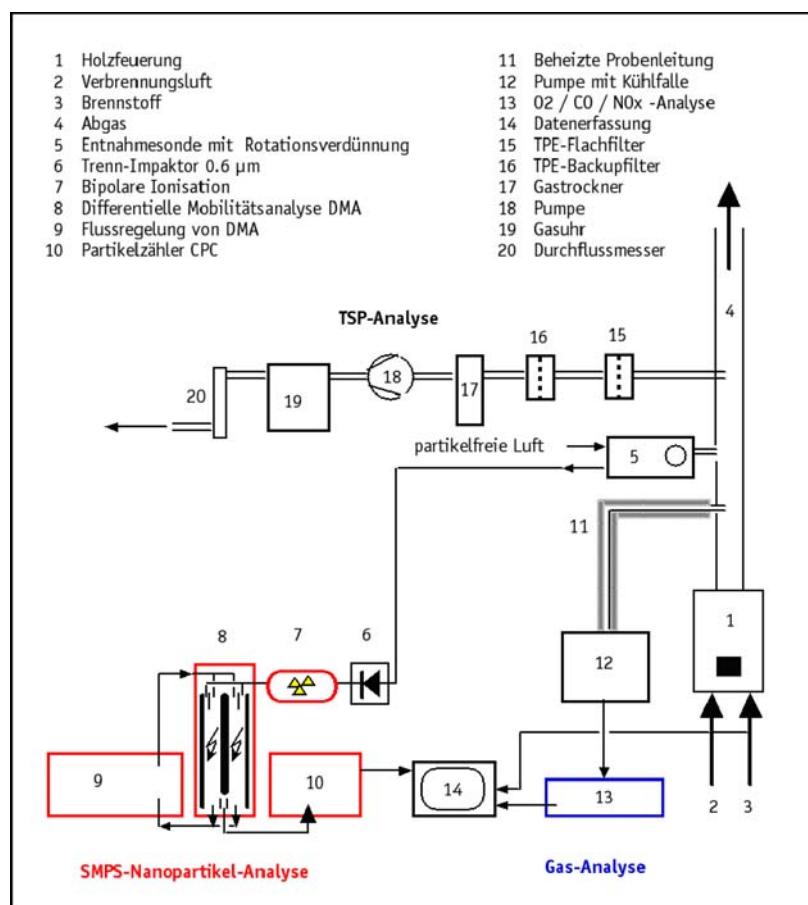


Abbildung 2 Messaufbau in der Feldmesskampagne zur Bestimmung von Gesamtstaub, Partikeln und gasförmigen Emissionen in den Abgasen.

In einer beheizten Sonde wurde der Abgasprobestrom mit filtrierter Verdünnungsluft gemischt. Der Verdünnungsfaktor kann über die Drehzahl einer Mischscheibe, die Probengasvolumina in die Mischkammer überführt, konstant eingestellt werden. Mit der verwendeten Mischscheibe stehen Verdünnungsverhältnisse von 1:40 bis 1:800 stufenlos zur Verfügung. Um Kondensatpartikel im Probegas zu verhindern, wurde der Verdünnungsfaktor auf 100 festgelegt. Der Taupunkt von Wasserdampf lag damit immer deutlich unter der Umgebungstemperatur. Bei sehr geringen Partikelanzahlen wurde der Verdünnungsfaktor nach Bedarf reduziert.

Die SMPS-Geräteeinstellungen wurden für alle untersuchten Anlagen wie folgt festgelegt:

- Volumenstrom Probengas: 0.4 l/min
- Volumenstrom DMA (Schild): 4.0 l/min
- Upscan (Analyse): 120 sec
- Downscan (Reset): 30 sec
- 3 Samples pro Anlage je vor und nach Filter
- 10 Scans pro Sample
- Korrektur der Ladungsverteilung gemäss Software TSI V. 3.2 (Charge Correction)

2.3 Gasanalyse und Temperaturmessung

Simultan zur Partikelmessung wurden folgende Größen kontinuierlich erfasst:

- Kohlendioxid CO₂ [%]
- Kohlenmonoxid CO [ppm und %] Analysegerät mit zwei verschiedenen Messbereichen
- Stickoxid NOx [mg/m³]
- Temperatur an der Messstelle im Abgaskamin
- Umgebungstemperatur
- Temperaturen in den Gasuhren der zwei TPE - Messstrecken.
- Luftdruck am Messort (jeweils nur einmal pro Messtag erfasst)

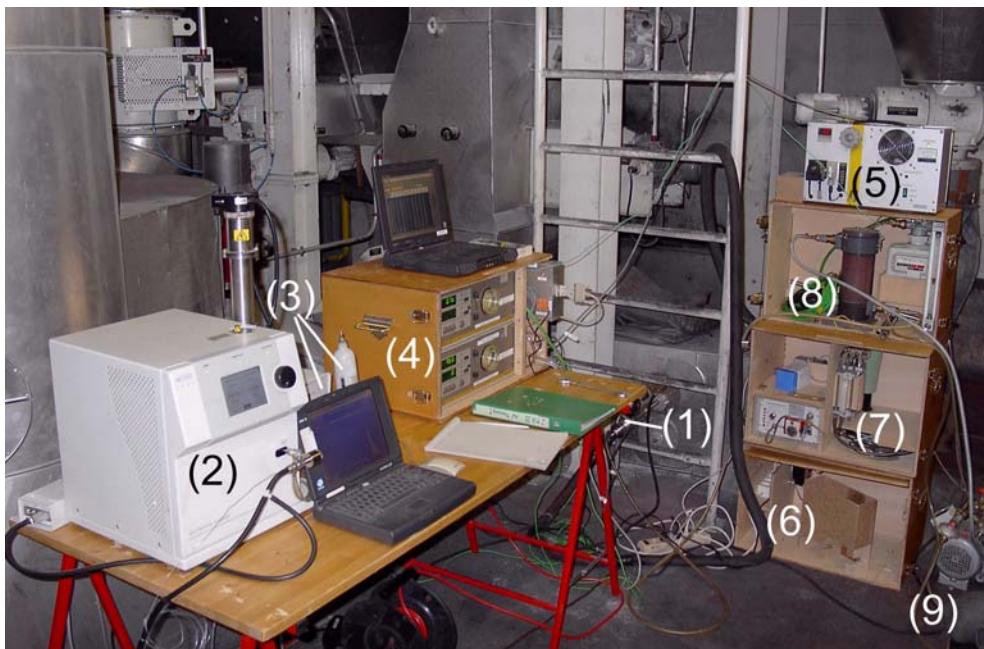


Abbildung 3 Komplette Messeinrichtung im Einsatz. Die nummerierten Geräte werden in der folgenden Legende beschrieben.

Legende zu Abbildung 3:

- 1) Gassonden (siehe Abbildung 4)
- 2) Differentielle Mobilitätsanalyse DMA für Feinpartikel $< 0.6 \mu\text{m}$ (zum SMPS gehörend)
- 3) Partikelzähler mit Reinluftfilter CPC (zum SMPS gehörend)
- 4) Gasanalyse-Geräte (CO_2 , CO , NO_2)
- 5) Pumpe mit Kühlzelle für Gasanalyse
- 6) Beheizter Gaszulauf für Gasanalyse
- 7) Rotationsverdünner und Pumpe zu SMPS (demontiert)
- 8) Gastrockner, Gasuhr und Durchflussmesser für Gesamtstaub-Messung
- 9) Pumpe für Gesamtstaub-Messung



Abbildung 4 Proben- und Gasentnahme über EMPA-Flansch aus dem Kamin. Rechts die beheizte Gassonde der Gasanalyse, unten links verdeckt der Rotationsverdünner des SMPS-Systems, sowie zuoberst die beheizten Filterhalter der Gesamtstaub-Messung.

2.4 Messdatenauswertung

Mit einer für die Messanalytik eigens konzipierten Auswertungssoftware wurde die gesamte Daten erfassung zusammengefasst und auf die entsprechenden Normwerte berechnet.

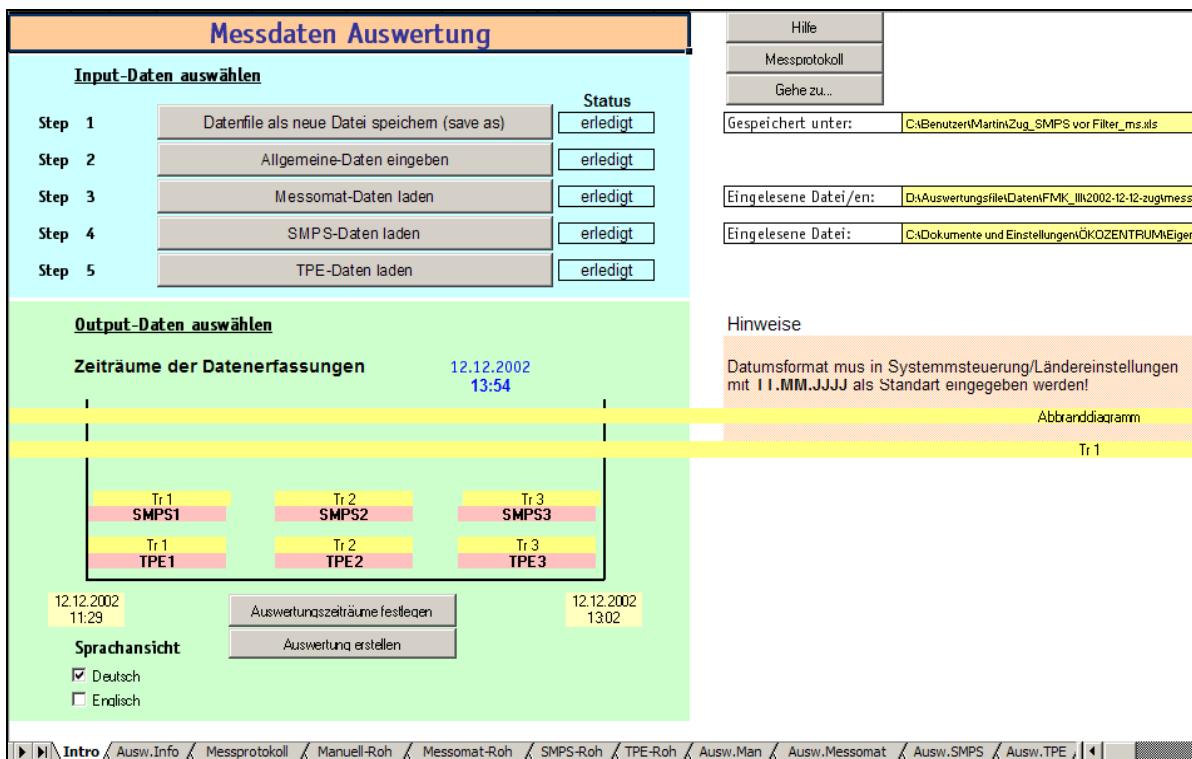


Abbildung 5 Bildschirmausschnitt aus der Eingabemaske der Messdatenauswertung.

3 Untersuchte Anlagen

Mit der Auswahl der Feuerungen wurde versucht, einen repräsentativen Querschnitt von Holzfeuerungen mit verschiedenen Filtersystemen für die Praxiserhebung zu finden. Die Effizienz der Staubemissionsminderung wurde sowohl an Elektro- und Gewebefiltersystemen wie auch an Anlagen mit Abgas kondensation als Nasswäscher analysiert. Die 7 ausgewählten Anlagen sind neuerer und neuster Bauart. Sie repräsentieren den heutigen Stand der Technik der Biomasseverbrennung bezüglich Feuerungs- und Staubabscheidetechnik. Bei sämtlichen Anlagen handelte es sich um Holzschnitzelkessel mit Vorschubrost. Alle Anlagen waren für die Staubabscheidung in einer ersten Stufe mit Zyklonstaubabscheider ausgerüstet.

Tabelle 1 **Untersuchte Anlagen**

Nummer	Abgasnachbehandlungssystem	Brennstoff	Nennleistung [kW]	Baujahr
17	Abgaskondensation	Wald- und Sägereihackschnitzel	2400	1995
18	Abgaskondensation	Wald- und Sägereihackschnitzel	800	1998
19	Elektro-Filter	Altholz	1800	1992
20	Elektro-Filter	Altholz	2400	1994
21*	Elektro-Filter	Altholz	2500	1998
22	Gewebe-Filter	Altholz, Karton und Papier	600	1996
23	Gewebe-Filter	Altholz	2500	2001

* Dampfkessel für Prozessdampf

Eine Anlage (21) erzeugt Prozessdampf, alle anderen lieferten Heizenergie in Form von Heisswasser für Fernwärmennetze.

Die Details zu den untersuchten Anlagen finden sich zusammen mit einem Beschrieb des Betriebes während der Messungen im Anhang. Jeder Anlage wurde zur Identifikation eine Nummer zugeordnet. Die Anlagennummern der vorliegenden Untersuchung beginnen mit 17 in Abstimmung mit den 16 bereits in den vorangegangenen Messkampagnen untersuchten Anlagen /8/.

4 Messresultate

4.1 Darstellung der Resultate

4.1.1 Emissionen

Die Messresultate der durchgeführten Gesamtstaub- und Partikelmessungen sind als Emissionsfaktoren angegeben, die auf dem unteren Heizwert des zugeführten Brennstoffs basieren. Die Emissionsfaktoren für Partikel < 600 nm sind in Anlehnung an die gängige Abkürzung von PM10 (Particulate Matter < 10 µm) mit PM0.6 bezeichnet. Die PM0.6-Emissionsfaktoren basieren sowohl auf der Partikelanzahl wie auf der Partikelmasse. Die Partikelanzahl (Symbol '#') folgt unmittelbar aus den SMPS-Messungen. Die Partikelmasse ist eine Abschätzung, die auf Grund einer angenommenen Partikelgeometrie und - dichte basiert. Für die Partikelform wurde eine kugelförmige Geometrie, für die Partikeldichte ein konstanter Wert von 1500 kg/m³ angenommen.

Um die ermittelten Daten mit Emissionswerten anderer Messungen vergleichen zu können, sind die Kohlenmonoxidwerte (CO) und der Gesamtstaub auch in den üblichen Konzentrationswerten aufgeführt. Diese Werte sind für alle Anlagen auf ein Normvolumina bei 13 % Sauerstoff bezogen.

Die Darstellung der Partikelverteilung erfolgte nach der in der Aerosolmesstechnik üblichen Weise. Die vom Mobilitätsanalysegerät gemessene Anzahlkonzentration der Partikel wurde logarithmisch dargestellt. Die kanalspezifische Partikelanzahlkonzentration (number concentration, NC) wurde aus dem Quotienten der bei dieser Kanalbreite gezählten Anzahl Partikel (dN) und dem Logarithmus der Kanalbreite (dlog(dp)) errechnet. Der aufgeführte Partikeldurchmesser (dp) entspricht dem Mobilitätsdurchmesser.

4.1.2 Abscheidekennzahlen

Bei hoher Abscheideeffizienz ist es sinnvoll, neben dem Abscheidegrad (AG) in Prozenten eine Abscheidewirksamkeit (AW) einzuführen. Die beiden Größen berechnen sich folgendermassen:

$$AG = \frac{M_{\text{vor-Filterung}} - M_{\text{Nach-Filterung}}}{M_{\text{vor-Filterung}}} \cdot 100[\%]$$

$$AW = \frac{M_{\text{vor-Filterung}}}{M_{\text{nach-Filterung}}}$$

Für den Ausdruck 'M' können dabei sinngemäss die Partikelmasse wie auch die Partikelanzahl (NC) stehen.

4.2 Brennstoffkennzahlen

Bei den Feuerungen, die waldfrische Hackschnitzel verbrannten, wurde in den Emissionsfaktoren der untere Heizwert (Hu) von Tannenholz verwendet. Laut Aussagen der Betreiber liegt der Tannenholzanteil im Brennstoff bei über 90%. Die Brennstofffeuchte basiert auf den Angaben in den Brennstofflieferscheinen.

Für die Altholz-Verbrennungsanlagen mit unbekannter Zusammensetzung des Brennstoffes wurde der untere Heizwert Hu von Buchenholz eingesetzt. Im Altholz waren teilweise Fraktionen von Altkarton beigemischt. Der Heizwert von Papier liegt deutlich unter demjenigen von Holz /12/. Mit dem Heizwert von Buchenholz, der kleiner ist als derjenige von Tannenholz, wurde dieser Gegebenheit Rechnung getragen. Die Feuchtebestimmung des Brennstoffes erfolgte bei den Altholz-Feuerungen mit Wägen und Trocknen von mehreren Stichproben aus dem Brennstoffsilo. Wegen den grossvolumigen Siloanlagen kann nicht vorausgesetzt werden, dass der analysierte Brennstoff mit dem zum Zeitpunkt der Emissionsmessungen verfeuerten identisch ist.

4.3 Abgaskondensationssysteme

4.3.1 Emissionswerte

Bei den zwei untersuchten Anlagen mit Abgaskondensation und -wäschersystem wurden sehr nasse, waldfrische Tannenholz-Hackschnitzel mit einer Brennstofffeuchte von 90 bis 100% bezogen auf Trockenmasse (atro) verfeuert. Bei der Anlage 17 war es möglich, die Untersuchungen bei Teil- und Volllastbetrieb durchzuführen, da in der Anlage zwei Kessel in Betrieb waren. Die Leistungsstufen sind in der Tabelle 2 durch die entsprechenden Prozentzahlen in Klammern [60% bzw. 100%] ersichtlich.

Bei der Anlage 18 variierte die Last entsprechend dem Wärmebedarf des Netzes. Die PM0.6-Messungen vor und nach dem Filtersystem erfolgten zeitlich gestuft nacheinander. Die TPE-Messungen erfolgten jeweils simultan vor und nach der Abgaskondensationsanlage.

Die Abgastemperaturen lagen bei Anlage 17 bei 47°C, bei Anlage 18 um 55°C. Anlage 17 war mit einer DENOX-Kammer ausgerüstet.

Tabelle 2 Anlagen mit Abgaskondensation

Anlage	Brennstoffart	energet. Wirkungsgrad	Gasförmige Emissionen		vor/nach Filter	Gesamtstaub (TPE)			Partikel PM 0.6		
			Kohlenmonoxid COst ¹⁾	Stickoxide NOx st		Staubgehalt ¹⁾	Emissionsfaktor Staub ²⁾	Abscheidegrad (bezügl. TPE)	Emissionsfaktor Partikelanzahl ²⁾	MODE-Durchmesser	Abscheidegrad (bezügl. PM0.6)
		[%]	[mg/m ₃]	[mg/m ₃]		[mg/m ₃]	[mg/ MJ]	[%]	10 ¹⁰ [#/MJ]	[nm]	[%]
17 [100%]	Hackschnitzel, waldfrisch	98.2	1.39	29.9	vor	68.7 ± 17.4 (*)	50.4 ± 12.8	41.7	5998 ± 290	65 ± 7	49.9
					nach	40.0 ± 15.3 (**)	29.4 ± 11.2		3010 ± 140	77 ± 2.0	
17 [60%]	Hackschnitzel, waldfrisch	95	1.46	20.7	vor	71.7 ± 9.7 (*)	52.6 ± 7.1	62.6	3974 ± 862	75 ± 5	46.7
					nach	26.8 ± 2.9 (**)	19.66 ± 2.15		2117 ± 853	102 ± 3	
18	Hackschnitzel, waldfrisch	95.2	19.5	108.2	vor	93.3 ± 15.4 (**)	67.4 ± 11.2	25.7	2008 ± 539	83 ± 6	60
					nach	69.3 ± 0.8 (***)	50.1 ± 0.6		832 ± 198	118 ± 7	

(*) aus 6 Werten

(**) aus 2 Werten

(***) aus 3 Werten

1) bezüglich 13% O₂

2) bezogen auf unteren Heizwert des Brennstoffes

4.3.2 Partikelgrößenverteilung

Die zwei Anlagen mit Abgaskondensation wurden in drei Betriebszuständen getestet: Anlage 17 bei 60% und 100% Leistung, die Anlage 18 im bedarfsgeregelten Betrieb. Es sind bei allen Messungen deutliche Vergrösserungen um 20% bis über 40% der MODE-Durchmesser nach der Abgaskondensation festzustellen. Ursache könnte die Agglomeration der Partikel sein. Mit Agglomerationseffekten liesse sich auch erklären, dass die Partikel-Anzahlkonzentrationen nach dem Wäscher stärker abnehmen als die Gesamtstaubemissionen.

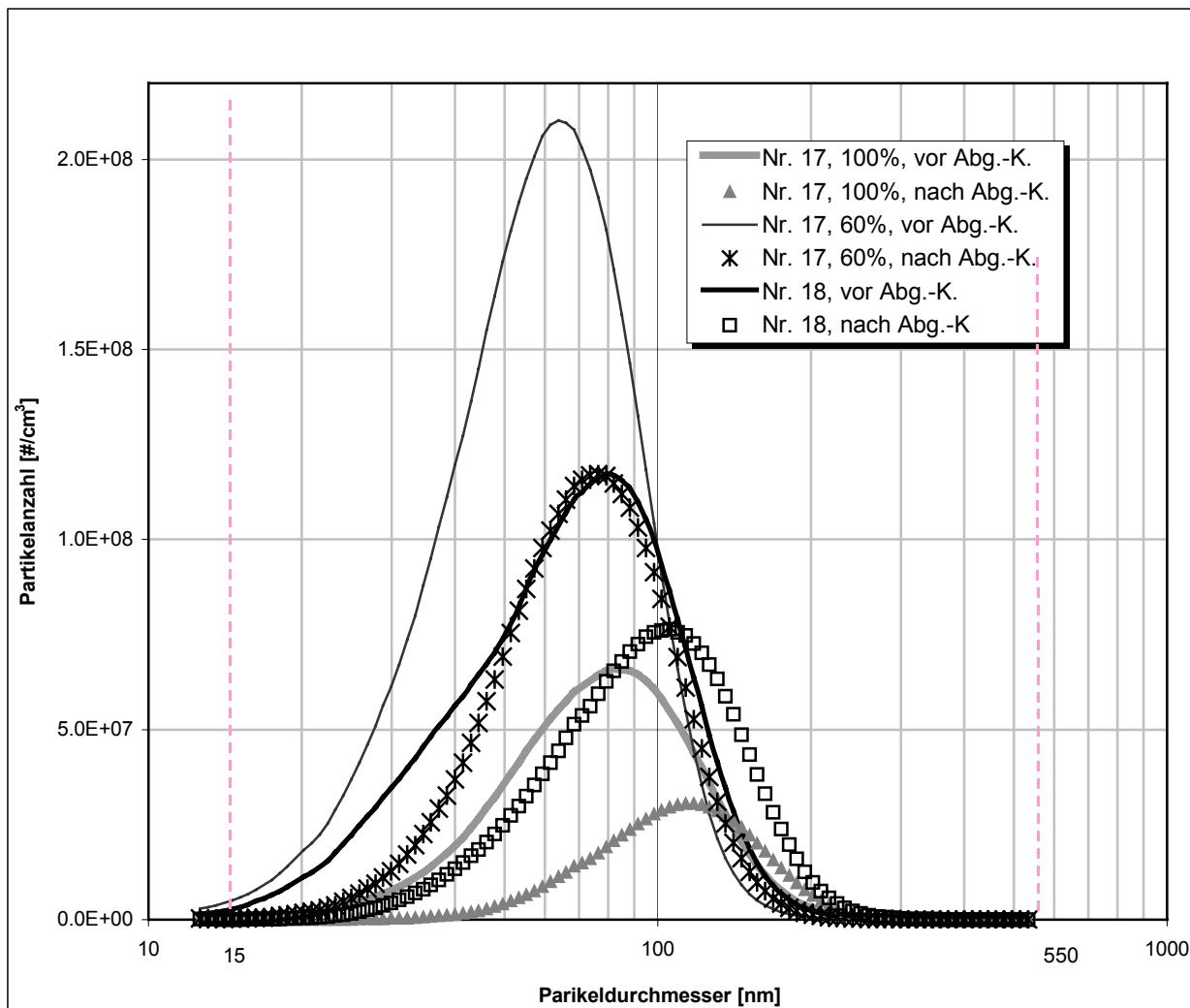


Abbildung 6

Abgaskondensationsanlage: Partikelgrößenverteilung vor und nach der Abgaskondensation der Schnitzelkessel 17 und 18;
(zur Beachtung: auf Grund der geringen Filtereffizienz wird hier ausnahmsweise eine lineare statt logarithmische Skala auf der Ordinate verwendet).

4.4 Anlagen mit Elektrofilter

4.4.1 Emissionswerte

Die beiden Anlagen 20 und 21 liefen sehr stationär und konnten gemäss den Vorgaben in Kapitel 2.2 getestet werden.

Die Anlage 19 konnte nur in den zwei Betriebszuständen Vollast und Gluthaltung gefahren werden. Obwohl die Umgebungstemperaturen um den Gefrierpunkt lagen, störten die kurzen Intervalle des Ein-Aus-Betriebes die Messungen zum Teil empfindlich. Dadurch mussten einige Messungen ab- bzw. unterbrochen werden. Sobald der Abgasventilator der Anlage abstellte, wurde bei den Messungen im Rohgas die TPE-Messung unterbrochen. Die SMPS-Messung lief weiter. Die entsprechenden SMPS-Scans in den Aus-Phasen der Anlage wurden aus den Messdaten entfernt. Die SMPS-Reingas-Messreihen in den Aus-Phasen wurden ebenfalls aus den auszuwertenden Daten entfernt. Dagegen liefen die TPE-Messungen im Reingas wegen der sehr geringen Staub-Emissionswerte weiter, dies bedeutet, eine reingasseitige Messung beginnt mit dem Anfang von der ersten rohgasseiteigen Messung und endet mit dem Ende der dritten rohgasseiteigen Messung.

Tabelle 3 Zusammenfassung der Messwerte der Anlagen mit Elektrofilter

Anlage	Brennstoffart	energet. Wirkungsgrad	Gasförmige Emissionen		vor/nach Filter	Gesamtstaub (TPE)			Partikel PM 0.6		
			Kohlenmonoxid COst ¹⁾	Stickoxide NOx st ¹⁾		Staubgehalt ¹⁾	Emissionsfaktor Staub ²⁾	Abscheidegrad (bezügl. TPE)	Emissionsfaktor Partikelanzahl ²⁾	MODE-Durchmesser	Abscheidegrad (bezügl. PM0.6)
		[%]	[mg/m _n ³]	[mg/m _n ³]		[mg/m _n ³]	[mg / MJ]	[%]	10 ¹⁰ [#/MJ]	[nm]	[%]
19	Altholz, trocken	81.8	2072	367	vor nach	197 ± 52.5 ⁴⁾	135.2 ± 36.2	99.19	9097 ⁵⁾	113	99.95
						1.60 ± 0.72 (**)	1.10 ± 0.51		4.52 ± 0.56 ⁶⁾	122 ± 2	
20	Altholz, trocken	78.6	243	404	vor nach	317 ± 74 (*)	217 ± 50	97.05	13'831 ± 1216	73 ± 11	99.5
						9.35 ± 1.58 (**)	6.39 ± 1.08		69.7 ± 50.7	120 ± 23	
21	Altholz, mittelfeucht	83.4	33.8	321	vor nach	328 ± 58 (*)	224 ± 39	97.43	6370 ± 730	78 ± 5	99.34
						8.42 ± 1.98 (**)	5.75 ± 1.35		42.3 ± 9.0	128 ± 3	

(*) aus 6 Werten

2) bezogen auf unteren Heizwert des Brennstoffes

(**) aus 2 Werten

4) aus 5 Werten

(***) aus 3 Werten

5) aus 10 Werten (1 Run)

1) bezüglich 13% O₂

6) aus 18 Werten (3 Runs à 6 Samples)

4.4.2 Partikelgrößenverteilung

Auch bei den Anlagen mit Elektrofiltern ist eine deutliche Verschiebung der MODE-Durchmesser zu grösseren Werten nach dem Filter feststellbar. Hierbei dürfte es sich hauptsächlich um Agglomerationseffekte handeln. Da der Elektrofilter die Partikel elektrostatisch auflädt, wurde darauf geachtet, dass die prüfgasleitenden Schläuche und Rohre bis zum DMA durchgehend elektrisch leitend und geerdet waren. Damit konnte sichergestellt werden, dass die SMPS-Messungen nicht wegen Abscheidung der Partikel an den Messgasleitungen verfälscht wurden.

Bei der TPE-Messung war die Problematik der statischen Aufladung nicht relevant, weil sich die Filter direkt beim Abgasrohr befanden.

Bei den elektrischen Partikelabscheidern ist bemerkenswert, dass die Partikelgröße nach dem Filter unabhängig von der Grösse der Partikel im Rohgas ist. Bei Anlage 19, wo durch den instationären Betrieb grosse Mengen an grösseren Partikeln zu messen waren, lag der MODE-Durchmesser nach dem Elektrofilter mit 122 nm im Mittelfeld der drei Anlagen.

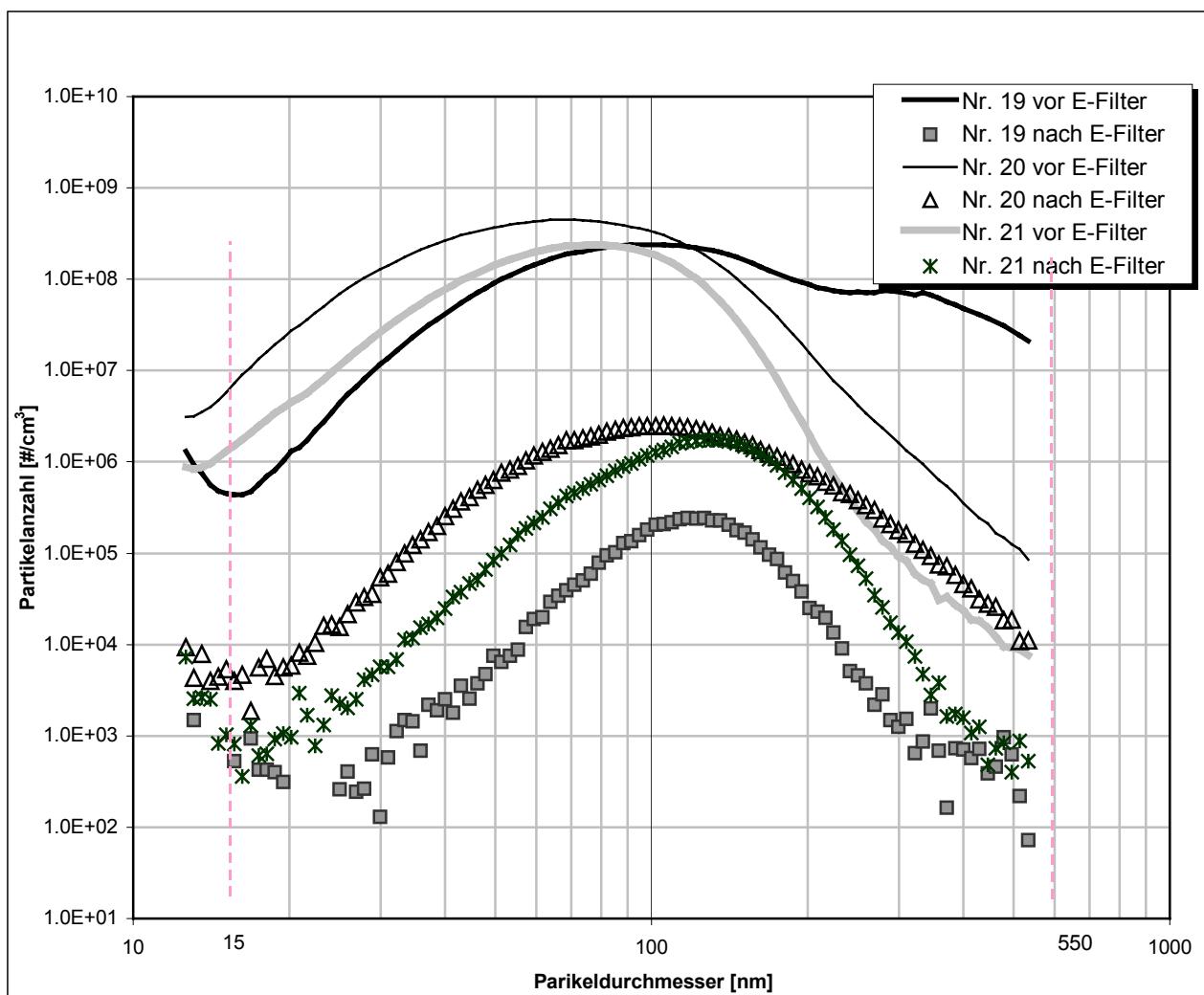


Abbildung 7 Elektrofilter: Partikelgrößenverteilung vor und nach dem Filter der Schnitzelkessel 19, 20 und 21.

4.5 Anlagen mit Gewebefilter

4.5.1 Emissionswerte

Die Anlagen 22 und 23 mit Gewebefilter waren zusätzlich mit einer Additive-Dosiereinrichtung ausgerüstet. Diese versetzte das Rohgas mit gelöschem Kalk (CaOH_2) in Pulverform. Mit Additiven können nicht nur die kondensierenden Partikel zusätzlich gebunden und abgeschieden werden, sondern auch die NOx-Emissionen beeinflusst werden.

Die Luftqualität bezüglich Partikelanzahl und -fracht des Reingases nach der Filterung entsprach jener der Raumluft oder war sogar besser. Da bei der Anlage 23 kein Zugang zum Rohgas möglich war, wurde alternierend das Abgas durch den Filter bzw. durch die Bypassleitung geleitet. Die Roh- und Reingasmessungen waren dort also auch für die TPE-Probenahmen zeitlich nicht simultan. Der Kessel lief sehr stabil, sodass die zeitlichen Verschiebungen der Messungen kaum Relevanz haben dürften.

Tabelle 4 Zusammenfassung der Messwerte der Anlagen mit Gewebefilter

Anlage	Brennstoffart	energet. Wirkungsgrad [%]	Gasförmige Emissionen Kohlenmonoxid COst ¹⁾ [mg/m _n ³]	Stickoxide NOx st ¹⁾ [mg/m _n ³]	vor/nach Filter	Gesamtstaub (TPE)			Partikel PM 0.6 Emissionsfaktor Partikelanzahl ²⁾ 10^{10} [#/MJ]	Partikel PM 0.6 MODE-Durchmesser Abscheidegrad (bezügl. PM0.6) [nm] [%]
						Staubgehalt ¹⁾ [mg/m _n ³]	Emissionsfaktor Staub ²⁾ [mg/ MJ]	Abscheide-grad (bezügl. TPE) [%]		
22	Altholz, Papier, Karton, trocken	86.4	30	2560	vor	491 ± 302 (*)	350 ± 227	98.80	1990 ± 357	135 ± 16
					nach	5.89 ± 3.57 (**)	3.93 ± 2.37		0.051 ± 0.006	(366 ± 32) ³⁾
23	Altholz, mittelfeucht	87.4	10	215	vor	121 ± 13 (***)	85.9 ± 9.2	97.56	5253 ± 976	92 ± 6
					nach	2.96 ± 2.40 (***)	2.09 ± 1.70		1.07 ± 0.13	110 ± 3

(*) aus 6 Werten

(**) aus 2 Werten

(***) aus 3 Werten

1) bezüglich 13% O_2

2) bezogen auf unteren Heizwert des Brennstoffes

3) Der reingasseitige MODE-Wert von Anlage Nr. 22 ist in Klammern gesetzt – siehe auch Kapitel 4.4.1.

4.5.2 Partikelgrößenverteilung

Bei den Anlagen mit Gewebefilter liegen die PM0.6-Konzentrationen im Reingas bei der Verwendung des Messgas-Rotationsverdünners zum Teil im Bereich der Messunsicherheit. Bei Anlage 22 war die Partikelkonzentration so niedrig (etwa halb so hoch wie die von typischer Raumluft), dass Versuche unternommen wurden, das Abgas direkt ohne Rotationsverdünner zu messen. Die durch den erhöhten Taupunkt bedingte Kondenswasserbildung stellte jedoch messtechnische Probleme. Die Scans, die trotz Kondensatproblemen zur Auswertung verwendet wurden, ergaben kein eindeutiges Bild hinsichtlich MODE-Durchmesser. Bei der Anlage 23 erfolgte eine Auswertung auf der Basis des Rotationsverdünners. Der MODE-Durchmesser zeigte eine Verschiebung zu grösseren Durchmessern im Abgas nach dem Filter. Der variierende Brennstoffmix bei Anlage 22 aus Altholz, Karton und Altpapier führte zum Teil zu recht hohen CO- und Staubemissionen. 25 Minuten Messdauer reichten mitunter aus, um die rohgasseitigen Filterhalter völlig mit schwarzem Russ zu bedecken.

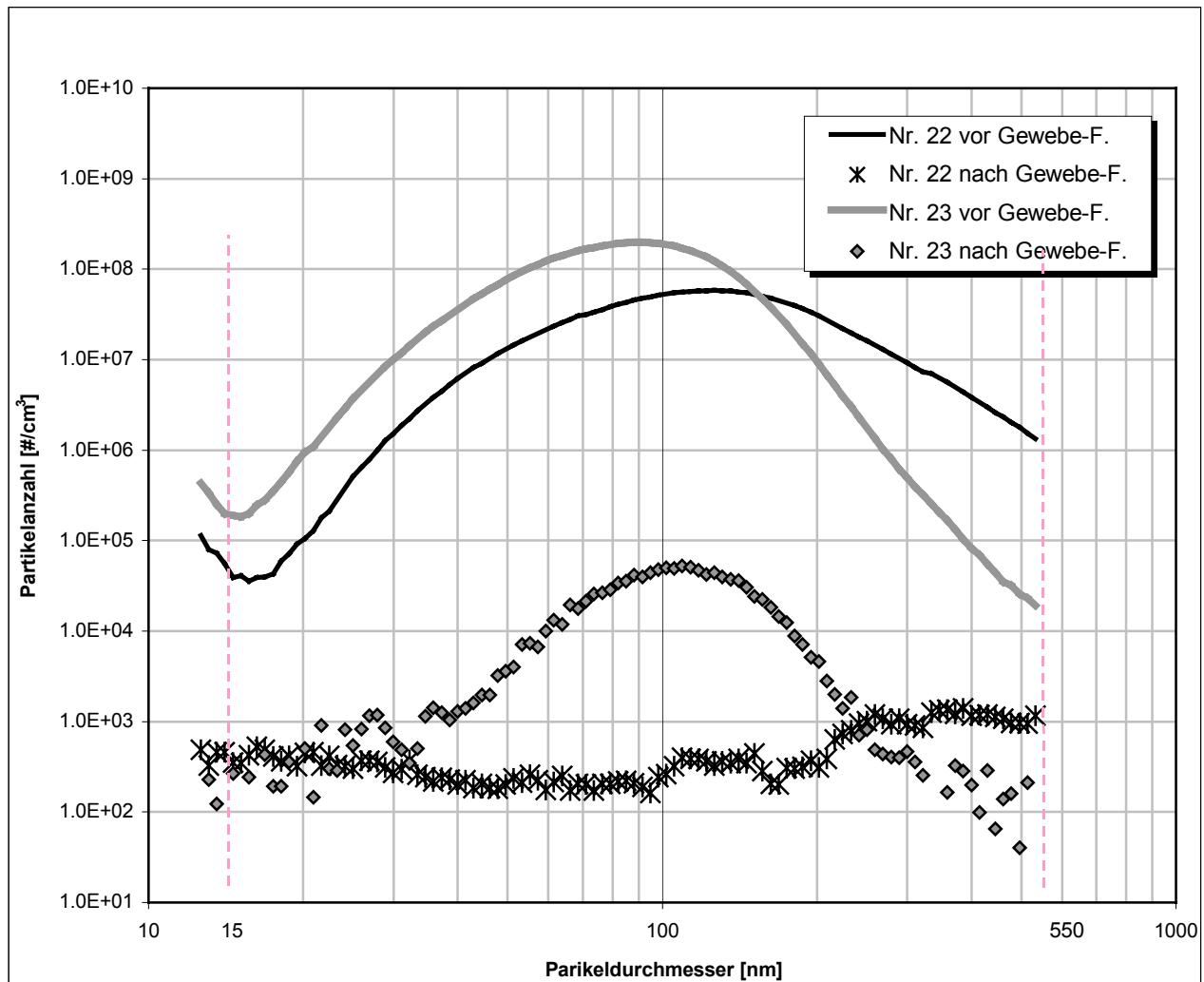


Abbildung 8 Gewebefilter: Partikelgrößenverteilung der Anlagen 22 und 23 mit Gewebefilter.

5 Diskussion

In einem ersten Teil dieses Kapitels werden die Emissionen im Roh- bzw. Reingas bezüglich Partikelanzahl (PM0.6), Veränderung der Partikelgrösse (MODE) und Gesamtstaubfracht (TPE) zusammengefasst und in einem zweiten Teil bezüglich Filtereffizienz diskutiert. In einem weiteren Abschnitt werden die Emissionen im Reingas der verschiedenen Abgasreinigungssysteme den LRV-Emissionsgrenzwerten gegenübergestellt. Schliesslich wird der Energiebedarf der einzelnen Abgasreinigungssysteme und die Energieeffizienz der Gesamtsysteme bewertet.

5.1 Abscheidewirkung

5.1.1 Abscheidewirkung bezüglich Partikelanzahl (PM0.6)

Im Hinblick auf die Diskussion um die Feinpartikel in der Atmosphäre interessierte in den vorliegenden Untersuchungen die Wirkung der Abscheideverfahren von Holzfeuerungsanlagen auf die feinsten Fraktionen der Staubpartikel. In Tabelle 5 sind die Messdaten zusammengefasst.

Tabelle 5 Zusammenstellung der Partikelanzahl-Messwerte im Roh- und Reingas der einzelnen Anlagen als Mittelwerte sämtlicher Messungen

Anlage	Emissionsfaktor Partikelanzahl $\times 10^{10} [\#/m^3]$ im Rohgas	Abscheide-grad [%]
17 [100%]	8170 \pm 393	49.9
17 [60%]	5420 \pm 1170	46.7
18	2880 \pm 746	60
19	13200	99.95
20	20'200 \pm 2071	99.5
21	9330 \pm 1007	99.34
22	2950 \pm 527	99.997
23	7430 \pm 1380	99.98

Gewebefilter weisen einen guten Rückhalt der Feinpartikel auf. Auch Elektrofilter reduzieren den Feinpartikelanteil. Der Abgaswäscher-Effekt der Kondensationsstufe erzielt die geringste Wirkung bezüglich Feinpartikelrückhalt (Abbildung 9).

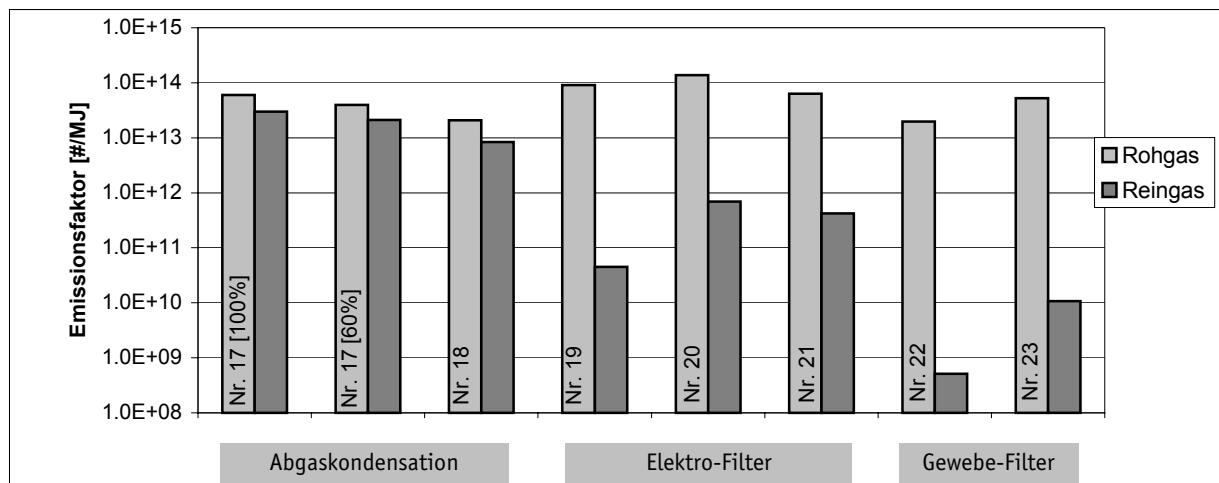


Abbildung 9 Gegenüberstellung der Abscheidewirkung der verschiedenen Abgasreinigungsanlagen in Bezug auf die Partikelanzahl im Roh- bzw. Reingas. Unter Abgaskondensation sind die Messungen bei Volllast [100%] und Teillast [60%] von Anlage Nr. 17 separat aufgeführt.

5.1.2 Abscheidewirkung bezüglich Gesamtstaub (TPE)

Elektro- und Gewebefilter reduzieren den Gesamtstaub sehr effizient (Tabelle 6). Die Abscheidewirkung von Staub in der Abgaskondensationsstufe ist deutlich geringer.

Tabelle 6 Zusammenstellung der Gesamtstaub-Messwerte im Roh- und Reingas der einzelnen Anlagen als Mittelwerte sämtlicher Messungen

Anlage	Gesamt-Staubgehalt (TPE) ¹⁾ [mg/m _n ³]		Abscheidegrad [%]
	im Rohgas	im Reingas	
17 [100%]	85.9 ± 21.8	50.0 ± 19.1	41.7
17 [60%]	89.6 ± 12.1	33.5 ± 3.6	62.6
18	93.3 ± 15.4	69.3 ± 0.8	25.7
19	246 ± 66	1.60 ± 0.72	99.19
20	396 ± 93	11.7 ± 2.0	97.05
21	410 ± 73	10.5 ± 2.5	97.43
22	614 ± 378	7.36 ± 4.46	98.80
23	151 ± 16	3.70 ± 3.00	97.56

¹⁾ bezogen auf 11% O₂ ausser Anlage Nr. 18 (< 1MW, bezogen auf 13% O₂)

In den untersuchten Anlagen haben die Gewebefilter im Schnitt den grössten Abscheidegrad für Gesamtstaub, gefolgt von den Elektrofiltern.

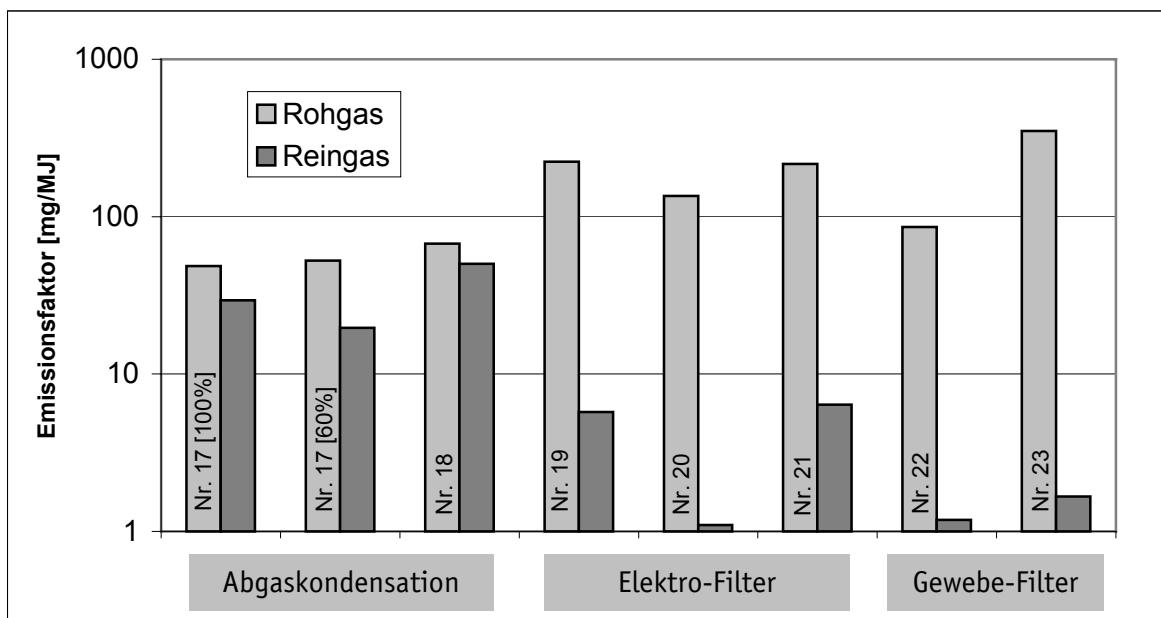


Abbildung 10 Gegenüberstellung der Abscheidewirkung der verschiedenen Abgasreinigungsanlagen in Bezug auf die Gesamtstaubemissionen (TPE) im Roh- bzw. Reingas.

5.1.3 Einfluss der Abscheidesysteme auf die Partikelgrösse (MODE) im Reingas

Eine Beurteilung der Partikelgrösse ist mit dem MODE-Durchmesser als Durchmesser der Partikelklasse mit der höchsten Partikelanzahlkonzentration möglich. Die Mittelwerte aus den jeweils rund 30 Messungen ergeben folgendes Bild (Tabelle 7).

Tabelle 7 Zusammenstellung der MODE-Durchmesser im Roh- und Reingas der einzelnen Anlagen als Mittelwerte sämtlicher Messungen

	Anlage	MODE [nm] im Rohgas	MODE [nm] im Reingas	Zunahme [%]
Abgas-kondensation	Nr. 17 (100%)	65	77	19
	Nr. 17 (60%)	75	102	35
	Nr. 18	83	118	42
E-Filter	Nr. 19	113	122	8
	Nr. 20	73	120	64
	Nr. 21	78	128	64
Gewebe-F.	Nr. 22	135	-	-
	Nr. 23	92	110	19

Die Partikelanzahlkonzentration von Anlage Nr. 23 war sehr niedrig und liess kein eindeutiges Maximum in der Größenverteilung erkennen. Die grafische Darstellung der obigen Werte ist in Abbildung 11 zu sehen.

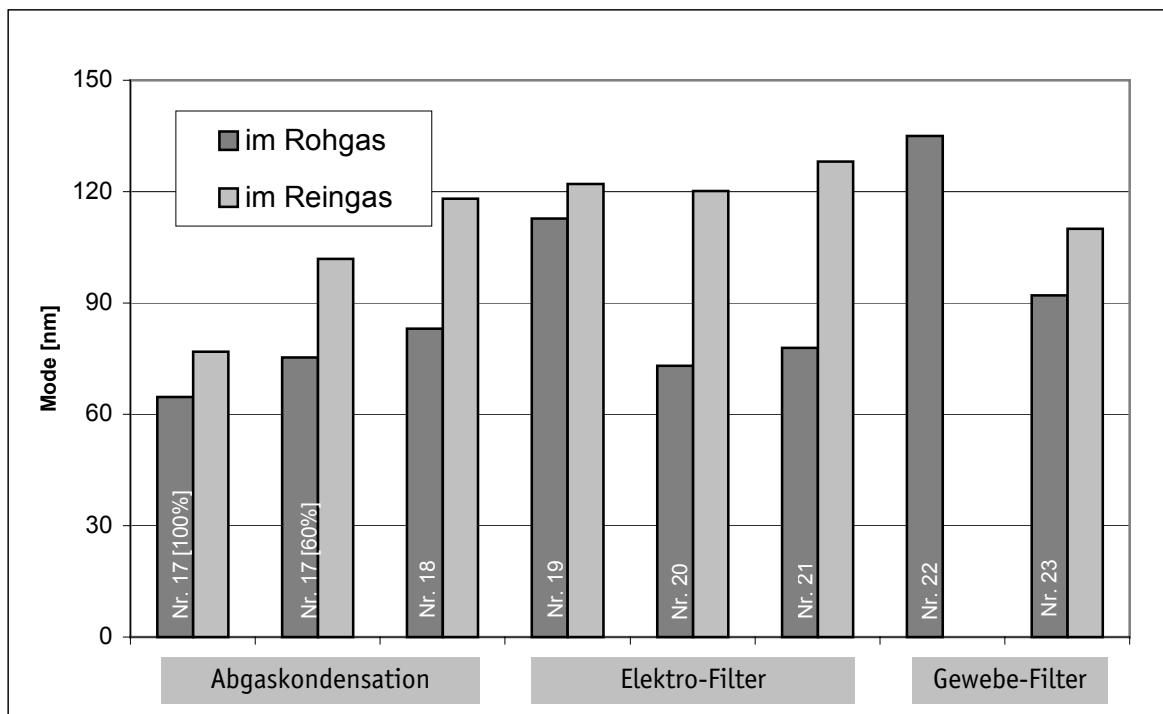


Abbildung 11 Gegenüberstellung des Einflusses der verschiedenen Abgasreinigungsanlagen auf die Partikelgrösse (MODE) im Reingas.

Es lassen sich keine anlagespezifischen Veränderungen der Partikelgrößen feststellen. MODE-Durchmesser im Rohgas um 100 nm oder grösser bedeuteten nur noch einen geringen Durchmesserzuwachs im Reingas.

Bei Elektrofilteranlagen führt das Verhältnis von Massenträgheit (ungefähr kubische Abhängigkeit von der Partikelgrösse) zur elektrischen Aufladbarkeit der Oberfläche (quadratische Abhängigkeit von der Partikelgrösse) zur tendentiell effizienteren Abscheidung von kleineren Partikeln.

Bei mechanischen Abscheidesystemen wie Gewebefiltern scheint die Tatsache, dass vor allem kleinere aerosolische Partikel wirkungsvoll zurückgehalten werden, und die Partikel im Reingas einen grösseren Mobilitätsdurchmesser als jene vor der Filterung aufweisen, auf den ersten Blick physikalisch nicht logisch. Mögliche Erklärungen dafür können thermische Koagulationen auf Grund der auch noch im Filter stattfindenden Kondensationsprozesse durch die Abkühlung des Gases, wie auch kinetische Koagulationen durch die hohen Geschwindigkeits- und Richtungsänderungen des Gases beim Durchtritt des Filtergewebes sein. Daneben finden vermutlich auch Agglomerationsprozesse statt.

In anderen Publikationen /15/ wird der Einfluss der Druckstossabreinigung von Gewebefilteranlagen diskutiert. Dabei wurde festgestellt, dass der Staubgehalt im Reingas während der Druckstoss-Abreinigung stark zunimmt. Kondensationsprodukte, die sich auf der Reingasseite des Filtergewebes anlagern, würden dann ebenfalls weggeschleudert.

5.2 Filtereffizienz

Von zentralem Interesse ist die Gegenüberstellung des Abscheidegrades der untersuchten Verfahrenstechniken. In diesem Kapitel werden sowohl die Wirksamkeit in Bezug auf die Partikelanzahlkonzentrationen (NC), wie auch auf die Gesamtstaubemissionen (TPE) angeschaut. Für die Betrachtung wurden sowohl die Abscheidegrad (AG) wie die Abscheidewirksamkeit (AW) verwendet. Die Definition der beiden Kennzahlen findet sich in Kapitel 4.1.2.

Die Abscheidegrad (AG), ausgedrückt als Prozentzahl des Quotienten von zurückgehaltener Partikelanzahl bzw. Partikelmasse und Partikelanzahl bzw. Partikelmasse im Rohgas ist in Abbildung 12 dargestellt.

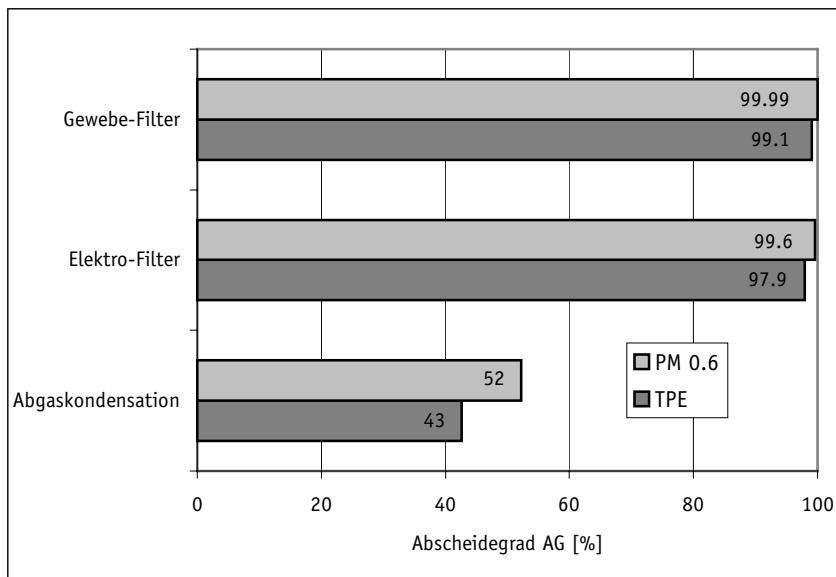


Abbildung 12 Abscheidegrad (AG) als Prozentzahl des Quotienten von zurückgehaltener Partikelanzahl bzw. Partikelmasse und Partikelanzahl bzw. Partikelmasse im Rohgas.

Betrachtet man die Filtereffizienz alleine auf Grund des Abscheidegrades (AG), so entsteht der Eindruck, dass sowohl Gewebe- wie Elektrofilter für Partikelanzahl wie auch Gesamtstaub eine ähnlich hohe Filtereffizienz aufweisen. Betrachtet man demgegenüber die Werte für die Abscheidewirksamkeit (AW) als Quotient aus Partikelzahl bzw. -masse im Rohgas und Partikelzahl bzw. -masse im Reingas, so entsteht ein anderes Bild (Abbildung 13).

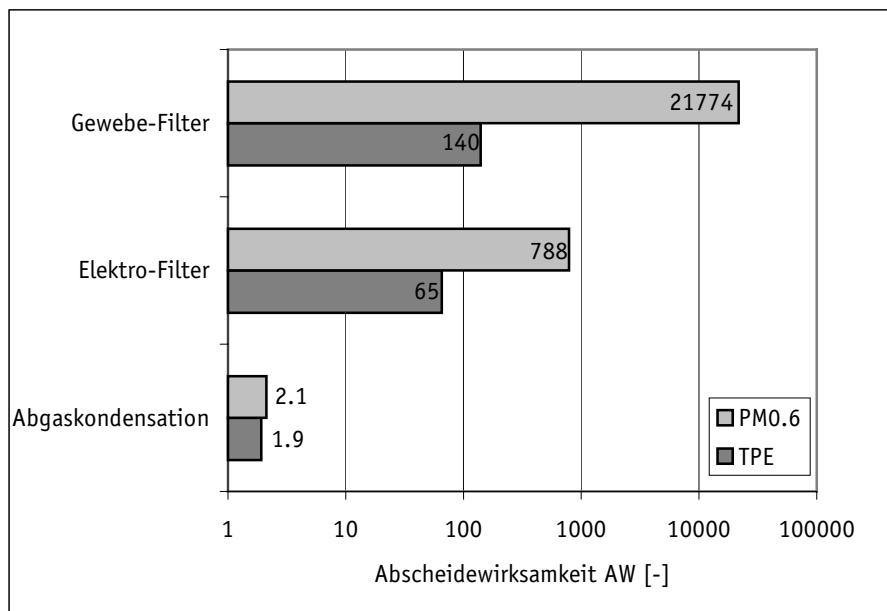


Abbildung 13 Abscheidewirksamkeit (AW) als Quotient der Partikelmengen in Roh- und Reingas.

Dabei gilt zu beachten, dass bei sehr niedrigen Gesamtstaubwerten im Reingas um 1 mg/MJ die gravimetrische Messung sich im Bereich ihrer Messungenauigkeit bewegt. Demgegenüber liefert die SMPS-Messmethode auch bei sehr geringen Partikelkonzentrationen verlässliche Daten. Das SMPS-System ist ein sehr empfindliches Messverfahren, das auch für sehr geringe Partikelkonzentrationen ausgelegt ist.

Es zeigt sich, dass die Filterwirksamkeit des Gewebefilters in Bezug auf die Partikelkonzentration hoch ist. Auch für die Reduktion des Gesamtstaubes ist der Gewebefilter den anderen Abscheidetechniken klar überlegen.

Die TPE-Messungen ergaben bei zunehmender Filtereffizienz deutlich höhere Frachten, als auf Grund der Partikelanzahl und Größenverteilung anzunehmen gewesen wäre. Die Hochrechnung lässt sich auf Grund der Modellannahme nach U. Wieser basierend auf Untersuchungen von M. Mohr /9/: Wird die Partikelmasse über den Mobilitäts-Durchmesser und mit einer angenommenen konstanten Dichte von 1500 kg/m^3 berechnet (PM-Emissionen im Anhang), so könnten diese Werte mit den TPE-Messungen verglichen werden /8/.

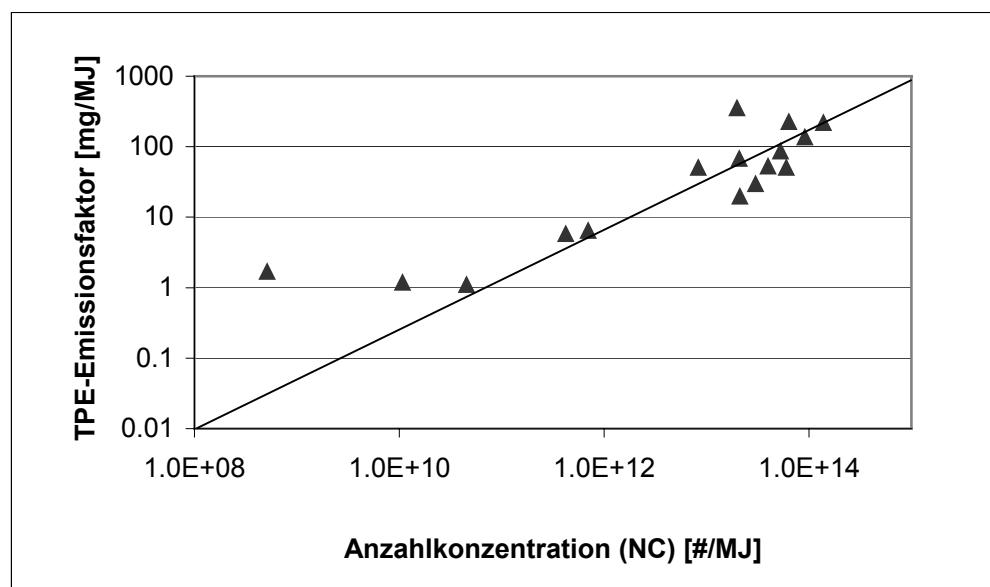


Abbildung 14 Korrelation von Partikelanzahl und TPE-Messungen.

Die Partikelanzahl (NC) korreliert mit dem Gesamtstaubauswurf (TPE) bei Staubwerten über 10 mg/MJ, unter 5 mg/MJ ist die Korrelation nicht mehr gegeben.

5.3 Spezifische Daten zu den Elektrofiltersystemen

Bei den Elektrofiltersystemen ist die zur Verfügung stehende Niederschlagsfläche bezogen auf den Abgasvolumenstrom ein wichtiger Parameter für die Abschätzung des Abscheidegrades. Da der Abgasvolumenstrom nicht gemessen wurde, beziehen sich die folgenden Abschätzungen auf die Kesselleistung.

Tabelle 8 Einfluss der Niederschlagsfläche auf den Abscheidegrad bei Elektrofiltern

Anlage	Kesselleistung	Niederschlagsfläche	Verhältnis Kesselleistung/Niederschlagsfläche	Abscheidegrad (bezügl. TPE)
19	1'800 kW (ein/aus-Betrieb)	(2 x 108 m ²) 216 m ²	8.33 kW/m ²	99.19%
20	2'400 kW (variabel)	300 m ²	8.0 kW/m ²	97.05%
21	2'500 kW (konstant)	115 m ²	21.7 kW/m ²	97.43%

Die Anordnung von zwei Elektrofiltereinheiten in Serie bei der Anlage 19 erhöht den Abscheidegrad gegenüber den beiden anderen Elektrofiltersystemen entscheidend. Das Verhältnis Kesselleistung zu Niederschlagsfläche ist aufgrund der Daten der Anlage 20 und 21 nicht für den Abscheidegrad massgebend, weil der Abgasvolumenstrom auf Grund eines hohen Luftüberschusses der Anlage 20 ($\lambda=4.3$) doppelt so hoch ist wie jener von Anlage Nr. 21 ($\lambda=2.3$). Die Belastung der Anlage Nr. 20 war zudem im Tagesgang variabel, währenddessen Anlage Nr. 21 kontinuierlich bei Kesselnennleistung betrieben wurde.

5.4 Reingasemissionen und LRV-Grenzwerte

Für die Emissionsgrenzwerte von Feuerungsanlagen sind grundsätzlich nur die Gesamtstaubemissionen relevant. Im Gegensatz dazu steht das Immissionsgesetz (LRV Kapitel 3, Anhang 7 /13/), das zusätzlich die Limitierung von Partikeln $< 10 \mu\text{m}$ (PM10) kennt. Im vorliegenden Kapitel werden die gemessenen Gesamtstaubwerte der Holzfeuerungsanlagen mit den LRV-Grenzwerten verglichen.

Tabelle 9 Die verschiedenen Grenzwerte gemäss LRV

Brennstoff	LRV-Ziffer	Kriterium	Grenzwert Gesamtstaub	Bezug
naturbelassenes Holz	Anhang 3, Ziffer 52	$> 70 \text{ kW} - 1 \text{ MW}$	150 mg/m_n^3	$13\% \text{ O}_2$
		$> 1 \text{ MW} - 5 \text{ MW}$	150 mg/m_n^3	$11\% \text{ O}_2$
		$> 5 \text{ MW}$	50 mg/m_n^3	$11\% \text{ O}_2$
Altholz und Papier	Anhang 2, Ziffer 72		50 mg/m_n^3	$11\% \text{ O}_2$
		davon Schwermetalle (Pb, Zi)	5 mg/m_n^3	$11\% \text{ O}_2$
Siedlungs- und Sonderabfälle*	Anhang 2, Ziffer 71		10 mg/m_n^3	$11\% \text{ O}_2$
		davon Schwermetalle (Pb, Zi)	1 mg/m_n^3	$11\% \text{ O}_2$

(*) darunter fällt auch druckimprägniertes oder PVC-beschichtetes Altholz

In Abbildung 15 sind die Messwerte den Grenzwerten der LRV gegenübergestellt.

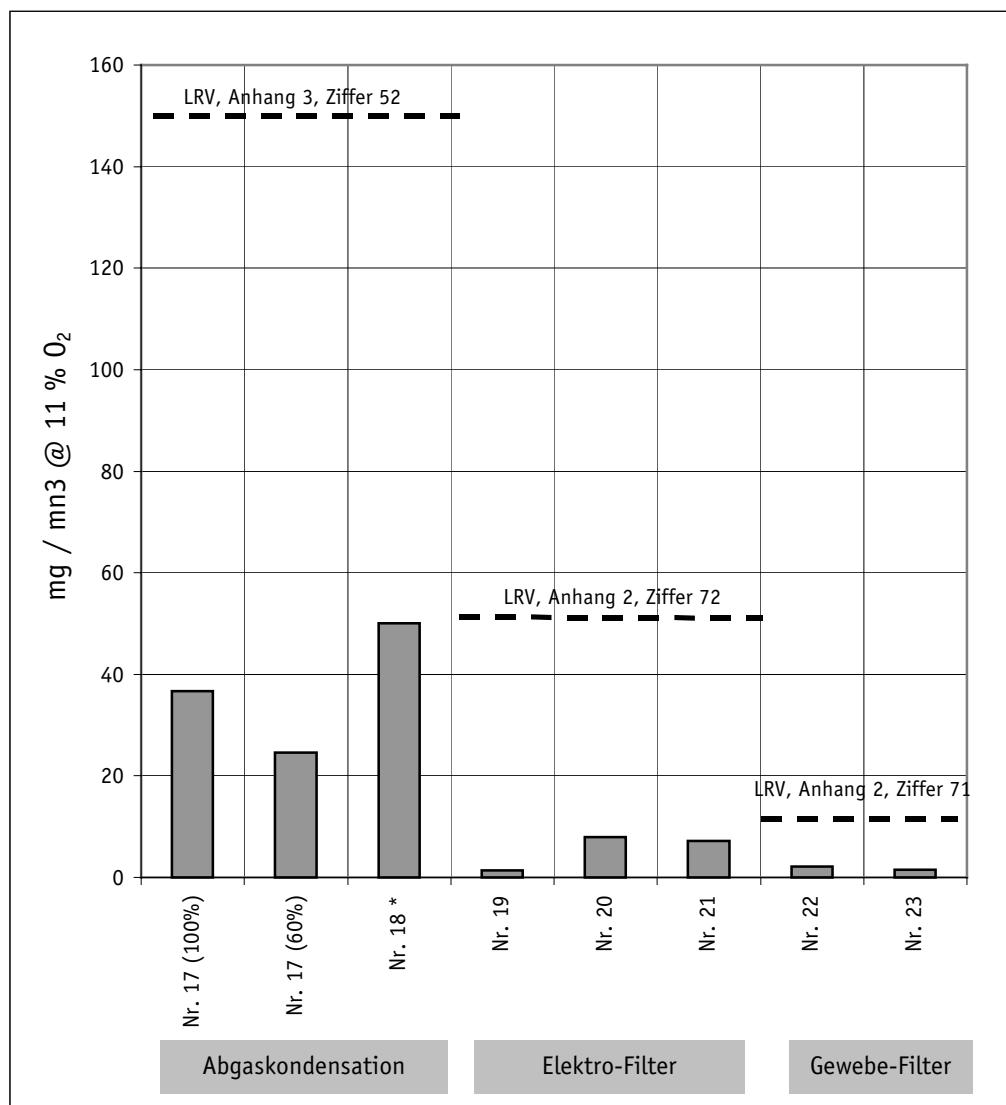


Abbildung 15

Die Messresultate aller Anlagen im Vergleich mit den jeweils relevanten Grenzwerten. Werte von Anlage 18* sind von 13% O₂ auf 11% umgerechnet (LRV-Grenzwerte von Anlagen < 1 MW beziehen sich auf 13% O₂).

Die Staubemissionen liegen bei allen Anlagen deutlich unter den LRV-Grenzwerten.

Bei der einen Anlage mit Gewebefilter (Nr. 23) wurde Altholz gemischt mit naturbelassenem Holz ohne sichtbare Spuren von anderen Abfällen verfeuert. Die Emissionen dieser Anlage müssen mit den LRV-Grenzwerten von Altholz verglichen werden.

5.5 Energiebedarf

Für die Energiebilanz des Gesamtsystems sind neben den erforderlichen Zusatzenergien für den Betrieb der Staubabscheidesysteme auch verfahrensbedingte Betriebscharakteristiken zu berücksichtigen. Die drei untersuchten Systeme haben denn auch unterschiedliche Betriebsbedingungen, was den energetischen Wirkungsgrad des gesamten Wärmeerzeugers stark beeinflusst, wie im Folgenden charakterisiert.

5.5.1 Zusatznutzen oder Aufwand durch das Abscheideverfahren

Abgaskondensationsanlage

Die Abgaskondensationsanlage gewinnt die Verdampfungswärme des Wasserdampfes in den Abgasen zurück. Bei feuchten oder wasserstoffreichen Brennstoffen lässt sich mit Abgaskondensationsanlagen die Effizienz deutlich steigern. Mit den Niedertemperatur-Wärmetauschern sind Abgastemperaturen um 50°C und Wirkungsgrade bezogen auf den unteren Heizwert des Brennstoffes von bis zu über 100% erreichbar. Die gemessenen Anlagen erreichten einen Wirkungsgrad von maximal 99%. Bei Anlage Nr. 18 wurde über die Heizsaison 2002/2003 der Anteil der Wärmerückgewinnung durch die Abgaskondensationsanlage mit 24.7% beziffert.

Elektrofiltersysteme

Elektrofilter müssen im Temperaturbereich zwischen 130°C und 280°C betrieben werden. Es darf im Elektrofilter keinesfalls der Abgastaupunkt unterschritten werden. Kondensat kann die Hochspannungsisolatoren verschmutzen und so Kurzschlüsse provozieren, was zu kompletten Systemausfällen führen kann. Die gemessenen Holzfeuerungsanlagen mit Elektrofilter erreichten in den vorliegenden Untersuchungen denn auch die niedrigsten feuerungstechnischen Wirkungsgrade, bei höchsten Rohgastemperaturen. Bei gleicher Brennstofffeuchte gibt es keinen technischen Grund Elektrofilteranlagen mit höheren Abgastemperaturen zu betreiben als Gewebefilter-Anlagen (siehe unten). Je nach thermischer Isolierung des Filters und Bemessung der spezifischen Filterfläche beträgt die Abkühlung der Abgase über die Filterstrecke bis 80 K. Der grösste gemessene Temperaturabfall wurde bei Anlage Nr. 19 festgestellt, die einen sehr instationären Betrieb aufwies (Ein-/Aus-Betrieb) und so die Komponenten des Abgasbehandlungssystems jeweils aufgeheizt werden mussten, was zur stärkeren Kühlung der Abgase beitrug. Bei stationärem Betrieb ist der Temperaturabfall deutlich geringer.

Gewebefilter

Die Anlagen mit Gewebefilter liegen im Mittelfeld der energetischen Wirkungsgrade der untersuchten Anlagen, obwohl auch sie vor Kondensat zu schützen sind. Gewebefilter müssen im Temperaturbereich zwischen 125°C und 250°C betrieben werden /15/ (Bei Holzbrennstoffen mit hohem Wassergehalt liegt der Temperaturbereich bei 180 – 250°C /15/). Inwieweit die Unterschiede in den Betriebstemperaturen der beiden Filtersysteme (Elektro-, bzw. Gewebefilter) zufällig sind, konnte nicht abgeklärt werden. Mit Additiven wie Kalk- oder Kalk-Herdofenkoks (Sorbalit, Aktivkohle) als Sorptionsmittel können Gewebefilteranlagen auch zur Abscheidung anorganischer und gasförmiger Halogenverbindungen wie zum Beispiel Quecksilber, Dioxine, Furane und Chlorwasserstoffe eingesetzt werden /11/, /14/.

Wie aus Abbildung 16 hervorgeht, ist der Wirkungsgrad der Holzfeuerung mit Abgaskondensationsanlage Spitzenreiter. Für die Berechnungen des feuerungstechnischen Wirkungsgrades wurde,

in Abstimmung auf die Energierückgewinnung bei den Abgaskondensationsanlagen, bei allen Anlagen die Reingastemperatur verwendet. Für Anlagen, deren Abscheideeinrichtungen jedoch im Freien stehen, ist dieser Ansatz in Bezug auf die wirklich zu Heizzwecken genutzte Wärme nicht ganz korrekt.

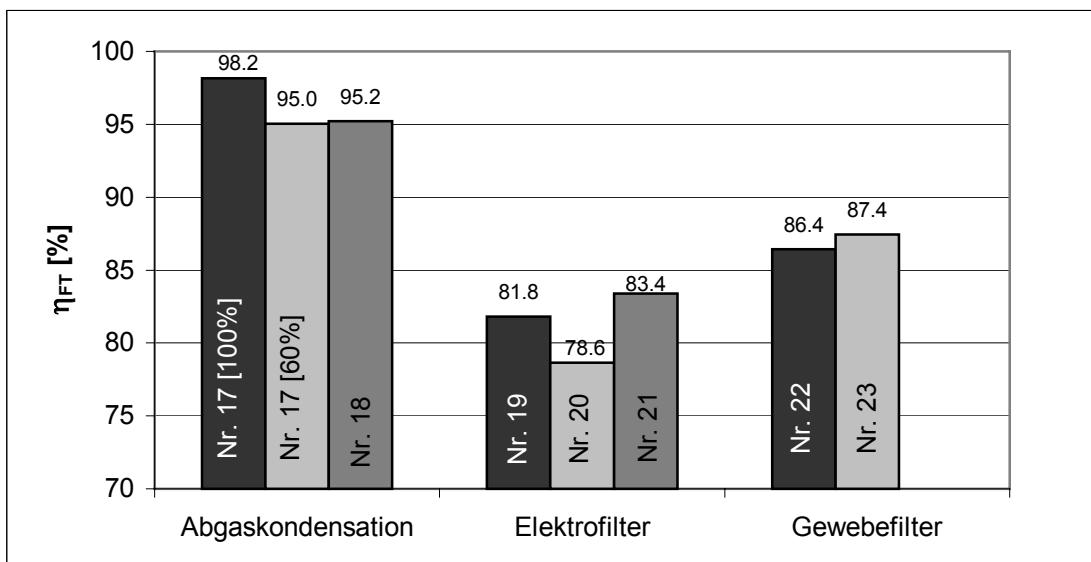


Abbildung 16 Vergleich der feuerungstechnischen Wirkungsgrade der untersuchten Holzfeuerungsanlagen.

Im Folgenden eine Aufstellung der Abgastemperaturen vor und nach dem Abgasnachbehandlungssystem, wobei die Rohgastemperaturen nicht bei allen Anlagen erfasst werden konnten.

Tabelle 10 Abgastemperaturen im Roh- bzw. Reingas

Anlage	Filtersystem	$T_{vor\ Filter}$ [°C]	$T_{nach\ Filter}$ [°C]	DT [K]	Bemerkungen
17	Abgaskondensation	123	47	76	Energie wird genutzt
18	Abgaskondensation	232	55	177	Energie wird genutzt
19	Elektrofilter	240 - 310	170 - 230	75	heizt nur unisolierten Heizungsraum
20	Elektrofilter	k.A.	155	-	heizt nur unisolierten Heizungsraum
21	Elektrofilter	220	188	32	Filter steht im Freien
22	Gewebefilter	k.A.	127	-	heizt nur unisolierten Heizungsraum
23*	Gewebefilter	148	140	8	heizt nur unisolierten Heizungsraum

(*) Anlage, bei der die Roh- und Reingas-Messungen an der gleichen Stelle vorgenommen werden durch Umleiten des Rohgases durch die Filter-Bypassleitung. Der Temperaturabfall ist über die Länge der ca. 4 Meter langen Bypass-Leitung nicht berücksichtigt. Die Angabe: „Heizt nur unisolierten Heizungsraum“ bedeutet jeweils auch, dass die Verbrennungsluft vorgewärmt wird.

Mit Ausnahme von Anlagen Nr. 19 und 20, die über den Wärmebedarf geregelt werden, beziehen sich die Angaben auf Betrieb bei Nennleistung.

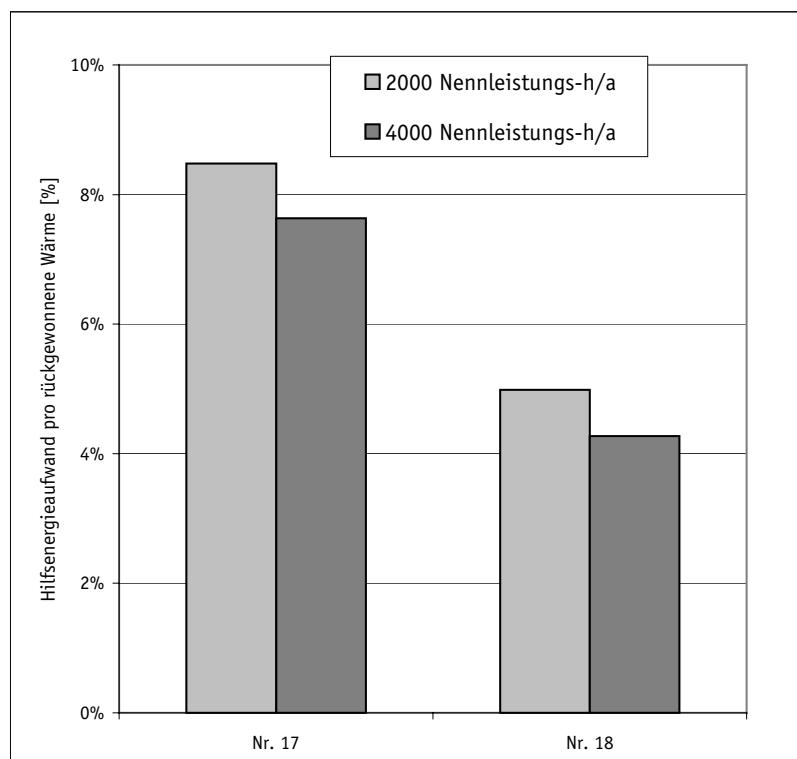


Abbildung 17 Anteil des Hilfsenergieaufwandes bezogen auf den erzielten Energiegewinn von Abgaskondensationsanlagen

5.5.2 Hilfsenergieaufwand

Durch die Befragung über betriebswirtschaftliche Aspekte der untersuchten Anlagen konnte auch der Hilfsenergieaufwand beziffert werden. Er wird im folgenden Diagramm als Prozentsatz der produzierten Nutzwärme (Kesselnennleistung x Jahres-Nennleistungsstunden) angegeben:

Tabelle 11 Hilfsenergieaufwand für die verschiedenen Filtersysteme in Prozent der Gesamtnutzwärmeproduktion [MWh/MWh]

Anlage-Nr.	Abscheidesystem	Kessel-Nennleistung [kW]	Hilfsenergieaufwand pro erzeugte Wärme [%] bei	
			2000 Nennleistungs-h/a	4000 Nennleistungs-h/a
17	Abgaskondensation	6000	1.11%	1.00%
18	Abgaskondensation	800	0.58%	0.50%
19	Elektrofilter	1800	0.50%	0.42%
20	Elektrofilter	2400	0.38%	0.31%
21	Elektrofilter	2500	0.24%	0.20%
22	Gewebefilter	600	1.56%	1.36%
23	Gewebefilter	2500	1.69%	1.44%

Annahmen Hilfsenergieaufwand (el. Energie) CHF 150.-/ MWh
 Energiegewinn (Brennstoffkosten Waldhackschnitzel) CHF 45.-/ MWh
 Jahresnutzungsgraderhöhung:
 Anlage 17 11 %
 Anlage 18 20 %

5.6 Vergleich der Partikelemissionen von Holz-, Gas- und Oelfeuerungen

Es zeigt sich, dass sich mit Elektro- und Gewebefilter die Partikelemissionen von Holzfeuerungen unter die Werte von Gas- und Oelkesseln absenken lassen (Abbildung 18).

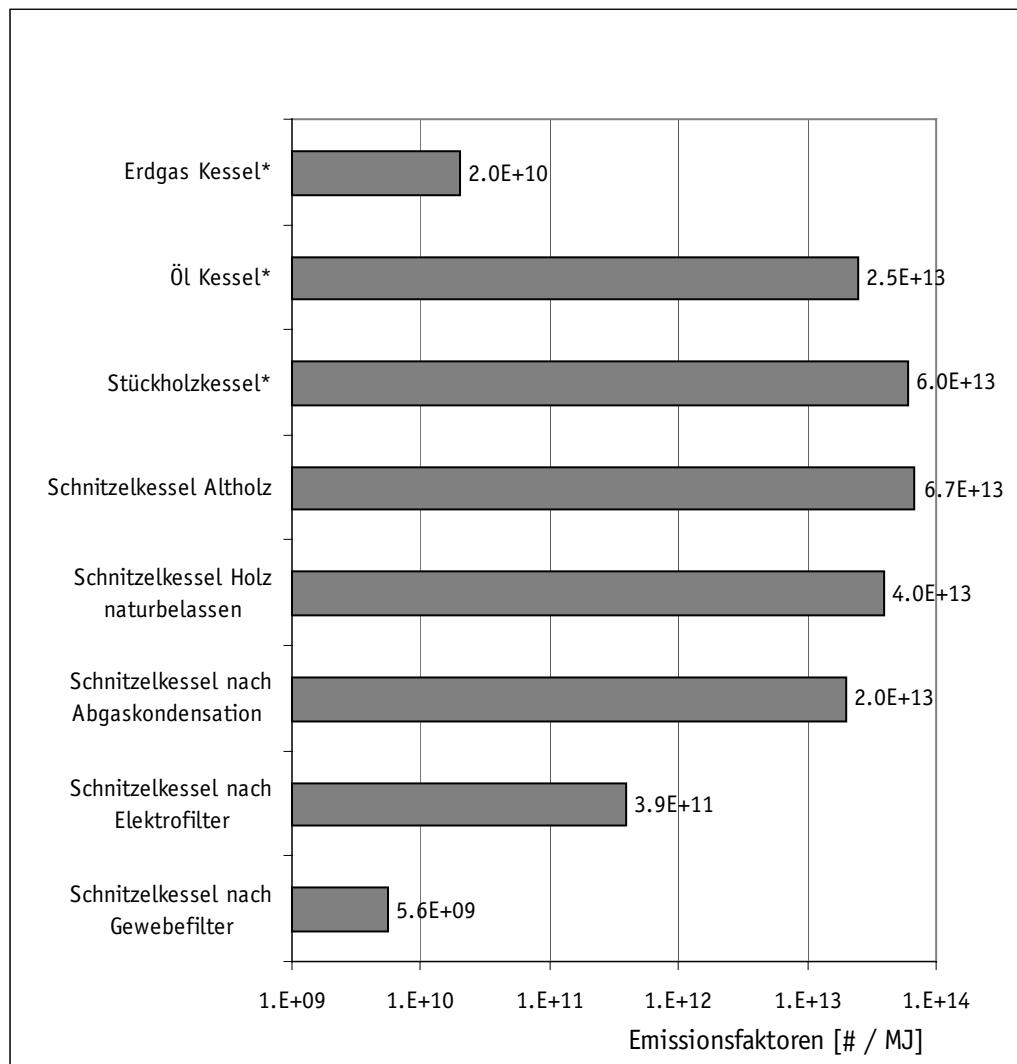


Abbildung 18 Emissionsfaktoren für PM0.6-Partikelkonzentrationen von Holzfeuerungen und Gas- und Oelkesseln.
(*) bezeichnet Werte aus früheren Untersuchungen /8/.

Während die MODE-Durchmesser der Partikel aus der Holzverbrennung nach der Filterung bei 80 bis 120 nm liegt, beträgt sie bei Gaskesseln nur 12 bis 30 nm. Letztere sind zwar physiologisch betrachtet lungengängiger, erstere haben aber eine grössere Oberfläche zum Transport toxischer Frachten wie z.B. PAH (polyaromatische Kohlenwasserstoffe). Wie diese beiden Parameter bei gleicher Partikelzahl zu werten sind, wäre Gegenstand weitergehender Untersuchungen.

6 Betriebswirtschaftliche Aspekte

6.1 Datenerhebung

Jeder Anlagenbetreiber wurde mit einem Erhebungsbogen über die Investionskosten und den jährlichen Aufwand für Wartung, Betriebsausfälle sowie anlagespezifische Besonderheiten befragt. Zusammen mit Ergebnissen aus früheren Arbeiten und einigen Annahmen, die auf Vergleichsdaten basieren wurden die Kosten berechnet.

6.2 Berechnung der spezifischen Filterkosten

Die spezifischen Filterkosten für das Betreiben eines Abscheidesystems werden durch folgende jährliche Kosten bezogen auf die produzierte Wärmemenge bestimmt:

- Kapitalkosten
- Betriebskosten aufgeteilt in
 - Wartungskosten
 - Unterhaltskosten
 - Hilfsenergiekosten

Dazu wurden folgende Annahmen getroffen:

- Hilfsenergiekosten: elektrische Energie CHF 0.15/kWh
Druckluft: CHF 0.30/m³
- Kapitalkosten: Bei Abgaskondensationsanlagen und Gewebefilteranlagen ergibt sich ein Raumbedarf des Abscheidesystems inklusive Zugang von 0.04 m³ pro kW Kesselleistung. Bei Elektrofilteranlagen beläuft sich der Raumbedarf auf 0.1 m³ pro kW Kesselleistung.

Basis bilden die an die Filteranlage angeschlossene Kesselnennleistung (bei Anlage Nr. 17 sind dies drei Kessel). Die Kesselnennleistung bezieht sich auf die Nennleistungen gemäss Typenschild, obwohl die meisten Anlagen diese auf Grund der gegebenen Brennstoffqualitäten nicht erreichen, wie in einigen Fällen auch der Vergleich mit den Daten der wasserseitigen Leistungsmessung zeigte.

6.3 Hilfsenergiekosten

Die Hilfsenergiekosten bei den einzelnen Abscheidesystemen werden durch folgende Kostenanteile bestimmt:

Abgaskondensationsanlagen

- 50 % des elektrischen Energiebedarfs für die zusätzliche Antriebsleistung des Abgasventilators zur Überwindung des Druckverlustes im Abgaskondensationssystem.
- 50 % für elektrischen Energiebedarf der Wäscherpumpe (konstante Leistungsaufnahme auch bei Teillastbetrieb des Kessels).
- Elektrischer Energiebedarf für Ventilatoren der Entschwadungseinrichtung, sofern vorhanden.

Elektrofilter

- 80 % des Hilfsenergieaufwandes für elektrischen Energiebedarf für den Aufbau eines Hochspannungsfeldes (konstante Leistungsaufnahme auch bei Teillastbetrieb).
- 20 % für elektrischen Energiebedarf für die Begleitheizung der Isolatoren, die Abklopf-einrichtung und Aschenaustrag.

Gewebefilter

- 25% des elektrischen Energiebedarfs für die zusätzliche Antriebsleistung des Abgasventilators zur Überwindung des Druckverlustes im Filtersystem (Druckverlust ca. 10 mal höher als bei Elektrofiltern) und für die Begleitheizung.
- 75% des elektrischen Energiebedarfs für die Aufbereitung des Druckluftvolumens, das für die Abreinigung der Filterelemente erforderlich ist.

In Absolutwerten ausgedrückt ergeben sich recht unterschiedliche Werte für die Hilfsenergiokosten. Sie bewegen sich zwischen 5.5% (Elektrofilter, 2'000 Jahres-Nennleistungsstunden) und 45% (Gewebefilter, 4'000 Jahres-Nennleistungsstunden) der gesamten spezifischen Filterkosten der Abscheidesysteme (Tabelle 12).

Tabelle 12 Spezifische Hilfsenergiokosten für Filtersysteme pro erzeugte Wärmeeinheit

Anlage-Nr.	Abscheidesystem	Kessel-Nennleistung [kW]	Hilfsenergiokosten pro erzeugte Wärme [CHF/MWh] bei 2000 Nennleistungs-h/a	Hilfsenergiokosten pro erzeugte Wärme [CHF/MWh] bei 4000 Nennleistungs-h/a
17	Abgaskondensation	2400	1.67	1.50
18	Abgaskondensation	800	0.88	0.75
19	Elektrofilter	1800	0.75	0.63
20	Elektrofilter	2400	0.56	0.47
21	Elektrofilter	2500	0.36	0.30
22	Gewebefilter	600	2.33	2.04
23	Gewebefilter	2500	2.53	2.16

Kosteneinsparung durch besseren Wirkungsgrad bei kondensierenden Anlagen:

Anlage 17 CHF 45.-/MWh

Anlage 18 CHF 90.-/MWh

6.4 Spezifische Filterkosten

Die spezifischen Filterkosten nach der im Anhang ersichtlichen Berechnung für die untersuchten Anlagen sind die Zusammenfassung aller Kosten, die sich aus Kapitalkosten, Betriebsausfällen, Wartung und allgemeinen Betriebskosten (Hilfsenergie, Hilfsstoffe, Betreuung) ergeben.

Für jedes der sieben Filtersysteme ergeben sich folgende spezifischen Filterkosten in CHF pro kWh produzierter Wärme (Tabelle 13).

Tabelle 13 Spezifische Filterkosten bezogen auf produzierte Energiemenge

Anlage-Nr.	Abscheidesystem	Kessel-Nennleistung [kW]	Spezifische Filterkosten [CHF/MWh] bei	
			2000 Nennleistungs-h/a	4000 Nennleistungs-h/a
17	Abgaskondensation	6000	6.3	3.8
18	Abgaskondensation	800	9.6	5.1
19	Elektrofilter	1800	13.7	7.1
20	Elektrofilter	2400	8.4	4.4
21	Elektrofilter	2500	6.2	3.2
22	Gewebefilter	600	16.2	9
23	Gewebefilter	3200	7.8	4.8

Kosteneinsparung durch besseren Wirkungsgrad bei kondensierenden Anlagen:

Anlage 17 CHF 45.-/MWh

Anlage 18 CHF 90.-/MWh

Die diesen Berechnungen zu Grunde liegenden Daten befinden sich im Anhang. In den Abbildung 19 und Abbildung 20 werden die Resultate der Abschätzung der spezifischen Filterkosten bei jährlich 2'000, bzw. 4'000 Nennleistungsstunden grafisch dargestellt:

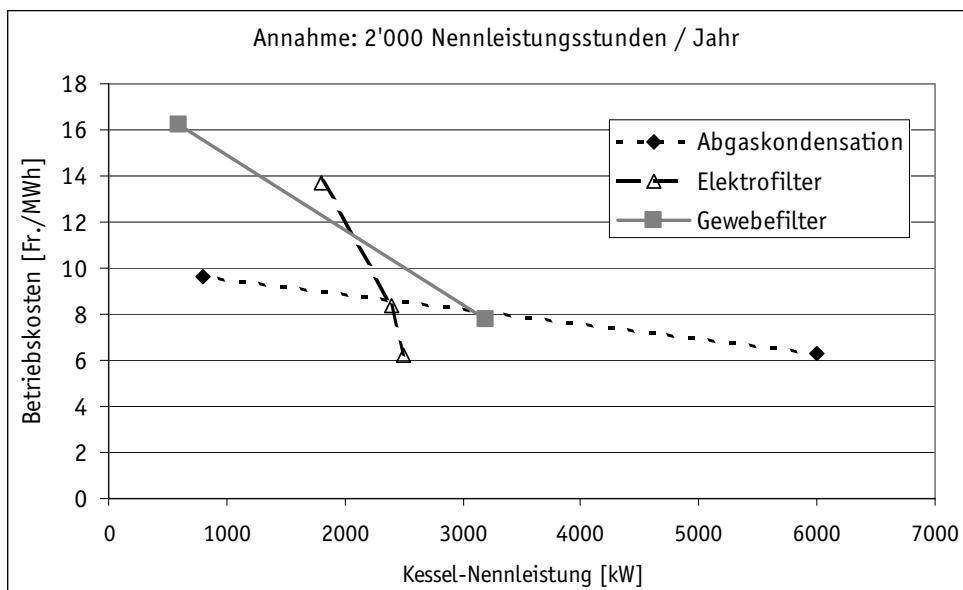


Abbildung 19 Spezifische Filterkosten der Abscheidevorrichtungen bei 2'000 Nennleistungsstunden pro Jahr.

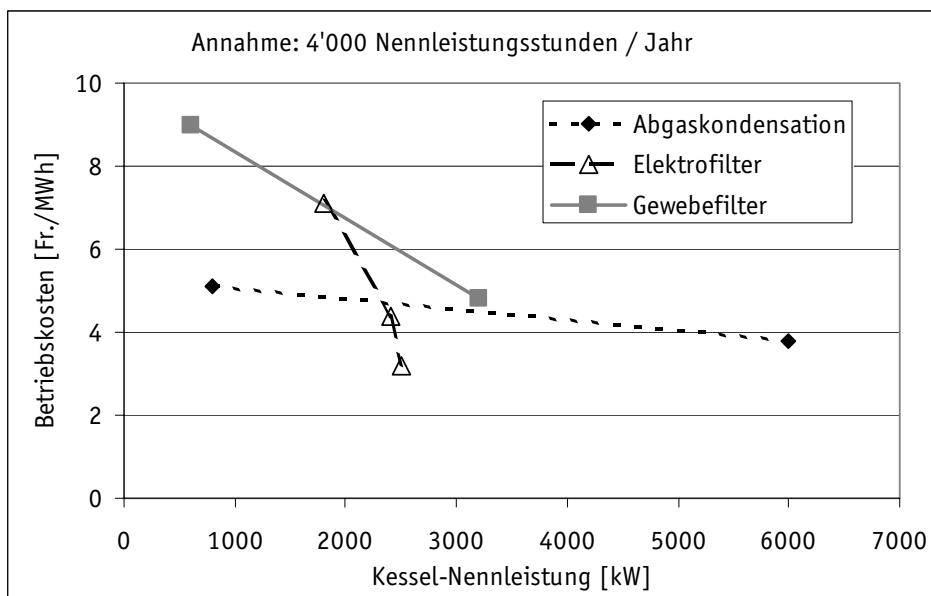


Abbildung 20 Spezifische Filterkosten der Abscheidevorrichtungen bei 4'000 Nennleistungsstunden pro Jahr.

Den beiden Diagrammen ist zu entnehmen, dass trotz höherem Betriebsaufwand die Gewebefilter für Kesselleistungen unter 2 MW verglichen mit den Elektrofiltern die kostengünstigere Variante darstellen. Die Abgaskondensationsanlagen ergeben bei grossen wie kleinen Kesselleistungen geringe Kosten, obwohl in den Berechnungen der zusätzliche Nutzen in Form eines um 11% (Anlage Nr. 17) bis über 20% (Anlage Nr. 18) erhöhten Jahresnutzungsgrades nicht berücksichtigt wurde. Für grosse Kesselleistungen weisen Elektrofilter die beste Wirtschaftlichkeit auf.

Bemerkungen zu den Einflüssen auf die spezifischen Filterkosten:

- **Kapitalkosten**
Filter für Kessel unter 1 MW Wärmeleistung und Elektrofilter weisen hohe spezifische Kapitalkostenanteile von 69 – 85% der spezifischen Filterkosten auf (siehe Berechnungen im Anhang).
- **Betriebskosten**
Abgaskondensationssysteme und Gewebefilter für Kesselleistungen unter 2 MW weisen einen hohen Betriebskostenanteil von 33 – 54% der spezifischen Filterkosten auf.
- **Nennleistungsstunden des Holzkessels**
Praktisch umgekehrt proportional zur Auslastung der Kesselanlage verhalten sich die spezifischen Filterkosten. Hier wurde je eine Berechnung mit 2'000 und 4'000 Nennleistungsstunden pro Jahr durchgeführt.
- **Kesselleistung**
Filtersysteme von Kesselanlagen unter 1 MW weisen um einen Faktor zwei höhere spezifische Filterkosten auf, als Filtersysteme von Kesselanlagen über 2 MW. Die spezifischen Filterkosten von Elektrofiltern bzw. Gewebefiltern weichen nicht stark ab, wobei bei höheren Nennleistungsstunden des Holzkessels der Elektrofilter durch den geringeren Hilfsenergiekostenanteil wirtschaftlicher wird.

6.5 Betriebssicherheit

Abgaskondensationsanlagen

Damit keine unerwünschten Ablagerungen im Wäscher und Wärmetauscher entstehen, welche die Anlage verstopfen könnten, ist darauf zu achten, dass beim Betrieb die Apparateflächen entweder trocken oder benetzt sind. Ein Wechsel von nassen und trockenen Phasen führt zu beschleunigter Verunreinigung der Wäscherteile.

Elektrofilter

Betriebsstörungen sind bei den drei untersuchten Elektrofiltern hauptsächlich entstanden, wenn ein verschmutzter Hochspannungsisolator durchgeschlagen hat. Ein Vorteil des Elektrofilters ist, dass bei einer Störung die Anlage nicht sofort stillgelegt werden muss.

Gewebefilter

Gewebefilter sind bezüglich Funkenwurf zu schützen, damit ein Filterbrand ausgeschlossen werden kann. Ein vorgeschalteter Multizyklonabscheider, gezielte Umlenkungen in der Abgasleitung und eine Funkendetektions- und Löschanlage sind die wichtigsten Massnahmen für die Verhinderung eines Funkenfluges. Die Kalkzugabe in das Rohgas bildet einen weiteren wirksamen Brandschutz. Gewebefilterelemente dürfen nicht feucht werden, da sich sonst der Filterstaub nicht mehr automatisch abreinigen lässt. Dies bedingt einen Bypassbetrieb verbunden mit einer elektrischen Filterheizung. Kleine Haarrisse und Löcher im Filtergewebe vermindern die Abscheideleistung dramatisch.

7 Beurteilung des Einsatzgebietes

In der folgenden Zusammenfassung werden die Einsatzgebiete der einzelnen Filtersysteme in Abhängigkeit der Filterwirksamkeit, Energienutzung, Brennstoffeigenschaften sowie der Betriebskosten beurteilt.

7.1 Abgaskondensationsanlage

Abgaskondensationsanlagen werden primär für eine bessere Energienutzung beim Verbrennen von Holz mit hoher Brennstofffeuchte ($u = 90\text{--}150\%$) eingesetzt. Wirkungsgraderhöhungen bis über 20% sind erzielbar. Die Reduktion der Staubpartikel um 50 % ist ein zusätzlicher Nutzen. Sie liegt im Vergleich zum Staubabscheidegrad von Elektro- und Gewebefiltern deutlich tiefer.

Die Wirtschaftlichkeit von Abgaskondensationsanlagen wird durch folgende drei Faktoren positiv beeinflusst:

- tiefe Rücklauftemperaturen im Heizsystem
- hoher Wassergehalt des Brennstoffs
- hoher Brennstoffpreis.

7.2 Elektrofilter

Das Einsatzgebiet von Elektrofiltern ist hauptsächlich bei Kesselanlagen über 2 MW gegeben, da die Grundinvestitionen (Hochspannungsanlage etc.) hoch sind. Elektrofilter haben einen hohen Raumbedarf. Da sie bezüglich feuchten Abgasen weniger empfindlich sind als Gewebefilter, können sie auch beim Verbrennen von Holz mit hohem Wassergehalt betrieben werden. Sie sind bezüglich Funkenflug unempfindlich und benötigen keinen Bypass zum Anfahren. Sie können in einem grösseren Temperaturbereich (130 – 280°C) betrieben werden als Gewebefilter. Da der Hilfsenergiokostenanteil bedeutend kleiner ist als bei Gewebefiltern, sind sie bei hoher jährlicher Auslastung der Kesselanlage wirtschaftlicher als Gewebefilter.

Anlage Nr. 19 mit zwei in Serie angeordneten Elektrofilteranlagen erreichte einen Abscheidegrad von über 99%. D.h. bei einem Gesamtstaubgehalt im Rohgas $< 1000 \text{ mg/m}^3$ sind noch Staubwerte im Reingas von unter 10 mg/m^3 erreichbar. Bei den Anlagen Nr. 20 und 21 wird ein Abscheidegrad von gut 97% erreicht. Gesamtstaubgehalte im Rohgas $< 300 \text{ mg/m}^3$ können damit auf Werte unter 10 mg/m^3 im Reingas reduziert werden.

7.3 Gewebefilter

Der ideale Einsatz von Gewebefiltern liegt in Verbrennungsanlagen von trockenen Holzbrennstoffen. Da mit der Kalkzugabe auch Sorptionsmittel für die Abscheidung von Dioxinen in den Abgasvolumenstrom gegeben werden kann, eignet sich der Gewebefilter im speziellen für die Altholzverbrennung, da der Brennstoff auch Chlorverbindungen enthalten kann. Vorteilhaft ist der um Faktor 2.5 bis 3 geringere Raumbedarf von Gewebefilteranlagen gegenüber Elektrofiltern bei gleicher Kesselleistung. Kompaktgewebefilter eignen sich für Kesselanlagen unter 1 MW bei beschränktem Raumbedarf. Bei Gewebefiltern gilt zu beachten, dass bei jedem Anfahrprozess der Feuerung über den Filterbypass (ca. 10 min) gefahren werden muss, was eine erhöhte Staubfracht bedeutet. Gewebefilter sollen in Anlagen mit möglichst kontinuierlichem Betrieb eingesetzt werden. Die Anforderungen an den Betrieb einer Holzfeuerungsanlage sind beim Einsatz von Gewebefiltern höher als beim Einsatz von Elektrofiltern. Der Funkenflug muss ausgeschlossen werden und die Filterelemente dürfen nicht feucht werden. Beim Verbrennen von Holz mit hohem

Wassergehalt muss die minimale Abgastemperatur auf über 180°C angehoben werden. Der hohe Hilfsenergieanteil, speziell für die Druckluftabreinigung, erhöht die spezifischen Filterkosten. Bei den Anlagen Nr. 22 und 23 wird ein Abscheidegrad von rund 98% erreicht. Bezuglich der Partikelanzahlkonzentration weisen die Gewebefilter gegenüber Elektrofiltern eine durchschnittlich zwanzigfach höhere Abscheidewirkung auf.

8 Schlussfolgerungen

- Filtersysteme zur Staubreduktion in Holzfeuerungsabgasen wirken sehr effizient. Mit den untersuchten Abgasreinigungsverfahren konnten die LRV-Grenzwerte im Praxisbetrieb um Faktor 3 bis 30 unterboten werden.
- Elektro- und Gewebefilter reduzieren die Partikelanzahlkonzentrationen im physiologisch relevanten Größenbereich von < 600 nm (PM0.6) noch wirksamer als den Gesamtstaub. Damit zeigt sich, dass die Filtersysteme auch Feinpartikel effizient zurückhalten. Dieser Sachverhalt lässt sich mit der Agglomerationswirkung durch Koagulation von kleinsten Partikeln erklären. Die folgende Aussage belegt diesen Punkt.
- Bei sämtlichen untersuchten Holzfeuerungen mit Abgasreinigung lagen die mittleren Partikel-durchmesser (MODE-Durchmesser) im Reingas bei ca. 120 nm. Der Ausgangsdurchmesser der Partikel im Rohgas hatte dabei keinen Einfluss. Waren die MODE-Durchmesser im Rohgas bereits nahe 120 nm, war die Durchmesserzunahme gering. Ein Hinweis, dass Agglomerationseffekte nur bis ca. 120 nm Partikeldurchmesser auftreten.
- Die kondensierenden Feuerungsanlagen, die naturbelassenes Holz verfeuerten, unterboten die LRV-Grenzwerte bereits im Rohgas. Zweck der Abgaskondensation ist in erster Linie die Nutzung der Verdampfungswärme im Wasserdampf. Die Auswaschung der Staubpartikel durch das Abgasquenching ist ein willkommener Zusatzeffekt. Die Filterwirkung durch die Abgaskondensationsanlagen erreichte einen Staubabscheidegrad von zirka 50%.
- Die Rohgase dürfen in Gewebe- und Elektrofilteranlagen nicht kondensieren. Bei Rohgas-temperaturen um minimal zulässige 140 °C liegt der maximal erreichbare feuerungstechnische Wirkungsgrad bei ca. 90%. Die untersuchten Anlagen wiesen Wirkungsgrade zwischen 79% und 88% auf. Um die Filteranlagen vor den Auswirkungen von Kondensat zu schützen, müssen erhöhte Rohgastemperaturen in Kauf genommen werden.
- Gewebefilteranlagen weisen bei Anlagen unter 2 MW etwas geringere Betriebskosten auf als Elektrofilteranlagen. Dies ist vor allem auf den hohen Platzbedarf der Elektrofilter zurückzuführen. Über 2 MW Kesselleistung sind Elektrofilter die kostengünstigere Variante. Abgaskondensationsanlagen verzeichnen günstige Betriebskosten bei allerdings geringerer Staubabscheidewirkung. Durch die Abgaskondensation erhöhte sich der Jahresnutzungsgrad der Kesselanlagen um 11 bis 20 %.
- Mit der SMPS-Messanalytik können auch noch bei den sehr geringen Partikelkonzentrationen im Reingas Aussagen über Größenverteilung und Anzahlkonzentration der Feinpartikel gemacht werden. Die Bestimmung des Gesamtstaubes (TPE) im Reingas lagen bei den Gewebefiltern im Bereich der Messunsicherheit.
- Während der Dauer der Messkampagne (4 Monate) hatten zwei Anlagen (beide mit Elektrofilter) einen durch das Filtersystem verursachten Totalausfall. Im Allgemeinen sind Elektrofilter jedoch unempfindlicher bezüglich Abgastemperatur, Funkenflug, und Feuchtigkeit als Gewebefilter.
- Der Vergleich der Partikelemissionsfaktoren von Holzfeuerungen mit Emissionsdaten von Gas- und Ölkesseln aus früheren Untersuchungen /8/ zeigt, dass Holzfeuerungen mit entsprechenden Filtersystemen in die Größenordnung der Partikelemissionen von Gas- und Ölkesseln gebracht werden können.
- Mit den ermittelten Partikelemissionsfaktoren von Holzfeuerungen in dem für Verbrennungs-aerosole typischen Bereich unter 600 nm lassen sich Kataster für die Quellenbelastung von Fein-partikeln (Durchmesser < 10 µm, PM10) für eine vorgegebene Population von verschiedenen Holzfeuerungsanlagen erstellen.

- Zur Beurteilung der physiologischen und damit zur lufthygienischen Relevanz von Feinpartikeln sind weitere Informationen zur Zusammensetzung, Struktur und Dichte der Partikel sowie zur Beladung derer Oberflächen mit Verbrennungsprodukten von zentraler Bedeutung. Es liegen erst wenige Informationen zur Partikelchemie vor /10/. Zur Partikelmorphologie und zur Oberflächenbeladung fehlen Untersuchungen weitgehend. In Fachkreisen wird die schädliche Wirkung der PAH (polyaromatische Kohlenwasserstoffe) auf der Partikeloberflächen diskutiert.

Literatur

- /1/ BUWAL (2001), *Massnahmen zur Reduktion der PM10-Emissionen*, Umwelt-Materialien Nr. 136, Luft, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern
- /2/ BUWAL (1995), *Luftschadstoff-Emissionen des Strassenverkehrs 1950 – 2010*, Schriftenreihe Umwelt Nr. 255, Luft, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern
- /3/ Cercle d'Air-Fachtagung *Massnahmenpläne 99*, 12.11.1998
- /4/ Wieser, U., Gaegauf, Ch. (2000), *Entwicklung und Test eines Messverfahrens für die ambulante Erfassung der Partikelfrachten aus Holzfeuerungsabgasen*, Ökozentrum Langenbruck, CH-4438 Langenbruck
- /5/ ISO/DIS 13336, Draft International Standard (DIS), *Solid fuel burning appliances - Test method for determining power output, efficiency and flue gas emissions*, International Organization for Standardization (1997)
- /6/ BUWAL (1996), Messempfehlung
- /7/ US/EPA-Messmethoden der Kategorie A (Method 5 – *Determination of Particulate Emissions from Stationary Sources*, Method 5G – *Determination of Particulate Emissions from Wood Heaters from a Dilution Tunnel Sampling Location*, Method 5H – *Determination of Particulate Emissions from Wood Heaters from a Stack Sampling Location*)
- /8/ Gaegauf, C.; Macquat, Y. und Wieser, U.; Feldmesskampagne *Partikelemissionen aus Holzfeuerungen* (2001), Ökozentrum Langenbruck, CH-4438 Langenbruck
- /9/ Mohr, M.; Feinpartikelemissionen von verschiedenen Treibstoffkonzepten am Beispiel eines Wagentyps, Vortrag am Kolloquium für technische Wissenschaften, ETH Zürich, 1998
- /10/ Oser, M.; Nussbaumer, Th.; Müller, P.; Mohr, M.; Figi, R.; *Aerosolbildung bei der Holzverbrennung und Beeinflussung der Staubemissionen durch gestufte Verbrennung*, 7. Holzenergie-Symposium (2002), Zürich
- /11/ *PM10-Feinstaubminderung bei automatischen Holz- und Biomassefeuerungen*, Bericht zum Stand der Technik; AWEL, ECOCAST
- /12/ Mitteilung Jenni, A.; Ardens GmbH, Liestal, 2003
- /13/ Revidierte schweizerische Luftreinhalteverordnung (LRV), in Kraft getreten 1.3.1998
- /14/ Nussbaumer, T.; Hasler, P.; Jenni, A.; Erny, M.; Vock, W.; DIANE 8 *Emissionsarme Altholznutzung in 1 – 10 MW Anlagen*, Bundesamt für Energie, 1994
- /15/ Jirkowsky, C.; Pretzl, R.; Malzer, T.; Sihorsch, K.; Scheuch GmbH, *Verfahren zur Staubabscheidung bei Biomassefeuerungen ab 100 kW*, 7. Holzenergie-Symposium (2002), Zürich

Danksagung

Die Untersuchungen wurden von den folgenden Stellen gefördert:

- Bundesamt für Wald, Landschaft und Umwelt (BUWAL), Bern
- Bundesamt für Energie (BFE), Bern

Anhang
Daten der untersuchten Anlagen

Anlage Nr. 17, (Vollast 100%)

SMPS-Messung vor Abgaskondensation, TPE vor Abgaskondensation, Gasanalyse nach Abgaskondensation

Messobjekt

Projektname	FMK III
Messobjekt	Schnitzelkessel, Vorschubrost
Leistung in kW (am Messtag)	2100 + 450 (Abgaskondensation)
Anlagenbeschreibung	2 x 2.4 MW + 1 x 1.2 MW Fernwärmeverbund (Wasser)

Versuchsbezeichnung

Datum	19.11.2002
Messbeginn	17:22:00
Messende	20:31:00

Versuchsumgebung

Umgebunstemperatur	°C	35.5
Umgebungsdruck	hPa	956
Rel. Luftfeuchtigkeit	%	20

Prüfbrennstoff

Prüfbrennstoffart		Tanne
Prüfbrennstoffmasse	kg	1000
Wassergehalt atro	mass%	100
Heizwert (unterer) Brennstoff	kJ/kg	19200
Heizwert Hu Brstfeucht	kJ/kg	8350

Emissionen**Kohlenmonoxid**

Kohlenmonoxid gemittelt	ppmv	1.701
CO-Emissionen 13%normiert	mg/mn3	1.745
CO-Emissionsfaktor Brst trocken	g/kg	0.021
CO Emissionsfaktor bez. Hu	mg/MJ	1.280

Stickoxide

NOx-Emissionen gemittelt	ppmv	10.311
NOx-Emissionen 13%normiert	mg/mn3	17.382
NOx-Emissionsfaktor Brst trocken	g/kg	0.213
NOx-Emissionsfaktor bez. Hu	mg/MJ	12.754

Energiebilanz

Verluste d. abgeführte Wärme im Abgas	%	1.2
Verluste d. geb. Wärme im Abgas	%	0.00
Verluste durch Rostdurchfall	%	0.0
mittl. Gesamt-Wirkungsgrad bez. Hu	%	98.8

Feuerungstechnische Daten

Abgastemp gemittelt	°C	47.5
Luftzahl	-	2.146
mittlerer CO2-Wert	Vol%	9.47

Anlage Nr. 17, (Vollast 100%), Fortsetzung

SMPS-Messung vor Abgaskondensation, TPE vor Abgaskondensation, Gasanalyse nach Abgaskondensation

Feinpartikel

	Dimension	Testrun 1	Testrun 2	Testrun 3	Mittelwert	Stand.-Abw.
Gesamtpartikelanzahl (SMPS)						
PTNC-Emissionen gemittelt 13% O ₂	#/cm3	8.97E+07	9.82E+07	9.69E+07	9.49E+07	4.56E+06
PTNC-Emissionen normiert Atm	#/mn3	9.33E+13	1.19E+14	1.01E+14	1.04E+14	1.29E+13
PTNC-Emissionen 13%normiert	#/mn3	7.73E+13	8.45E+13	8.34E+13	8.17E+13	3.93E+12
PTNC-Emissionsfaktor Brst trocken	#/kg	9.47E+20	1.04E+21	1.02E+21	1.00E+21	4.81E+19
PTNC-Emissionsfaktor bez. Hu	#/MJ	5.67E+13	6.20E+13	6.12E+13	6.00E+13	2.88E+12
Partikel Mode						
Partikel PM gemittelt 13% O ₂	kg/m3	1.9E-05	3.3E-05	3.2E-05	0.00	7.79E-06
PM-Emissionen normiert Atm	mg/mn3	20	40	34	31.34	10.25
PM-Emissionen 13%normiert	mg/mn3	17	29	28	24.38	6.71
PM-Emissionsfaktor Brst trocken	g/kg	0.204	0.351	0.341	0.30	0.08
PM-Emissionsfaktor bez. Hu	mg/MJ	12	21	20	17.89	4.92

Gesamtstaub (TPE)

	Dimension	Testrun 1	Testrun 2	Testrun 3	Testrun 4	Testrun 5	Testrun 6	Mittelwert	Stand.-Abw.
TPE-Emissionen gemittelt	mg/mn3	55.44	109.55	99.78	78.48	96.63	52.48	88.26	23.99
TPE-Emissionen 13%normiert	mg/mn3	45.80	78.20	81.96	64.73	81.38	44.50	68.65	17.39
TPE-Emissionsfaktor Brst trocken	g/kg	0.56	0.96	1.00	0.79	1.00	0.55	0.84	0.21
TPE-Emissionsfaktor bez. Hu	mg/MJ	33.61	57.38	60.14	47.50	59.71	32.65	50.37	12.76

Anlage Nr. 17, (Vollast 100%), Fortsetzung

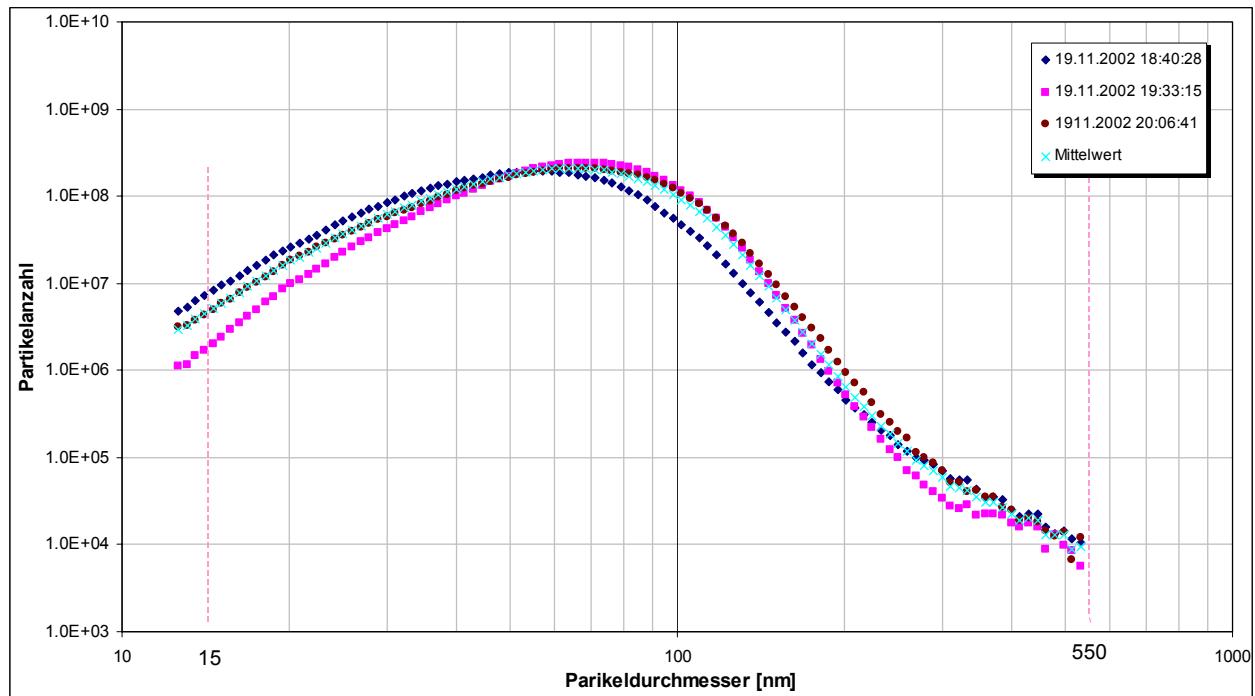
SMPS-Messung nach Abgaskondensation, TPE nach Abgaskondensation, Gasanalyse nach Abgaskondensation

Datum	19.11.2002
Messbeginn	16:00:00
Messende	17:50:00

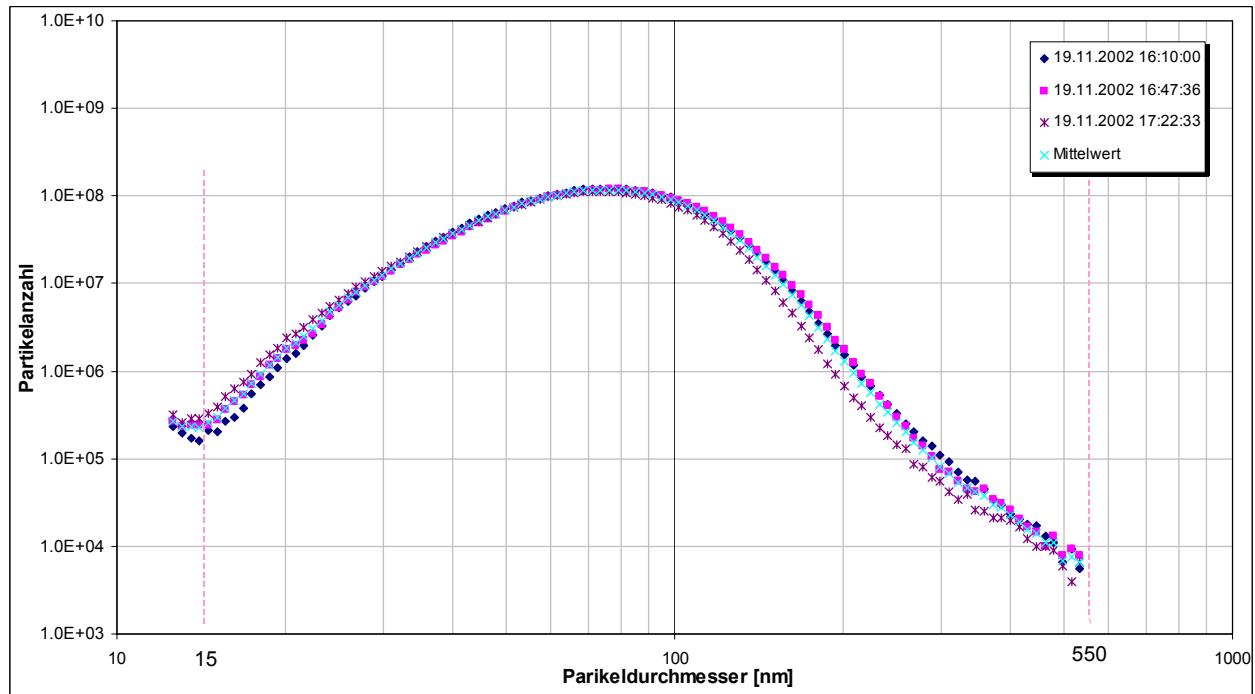
Emissionen	Einheit					
Abgastemperatur						
Abgastemp gemittelt	°C		47.5			
Kohlenmonoxid						
Kohlenmonoxid gemittelt	ppmv		1.000			
CO-Emissionen 13%normiert	mg/mn3		1.043			
CO-Emissionsfaktor Brst trocken	g/kg		0.013			
CO Emissionsfaktor bez. Hu	mg/MJ		0.765			
Stickoxide						
NOx-Emissionen gemittelt	ppmv		6.292			
NOx-Emissionen 13%normiert	mg/mn3		10.785			
NOx-Emissionsfaktor Brst trocken	g/kg		0.132			
NOx-Emissionsfaktor bez. Hu	mg/MJ		7.913			
Energiebilanz						
Verluste d. abgeführte Wärme im Abgas	%		2.5			
Verluste d. geb. Wärme im Abgas	%		0.00			
Verluste durch Rostdurchfall	%		0.0			
mittl. Gesamt-Wirkungsgrad bez. Hu	%		97.5			
Feuerungstechnische Daten						
Abgastemp gemittelt	°C		47.5			
Luftzahl	-		2.182			
mittlerer CO2-Wert	Vol%		9.32			
Feinpartikel						
	Dimensions		Testrun 1	Testrun 2	Testrun 3	Mittelwert tand.-Abw.
Gesamtpartikelanzahl (SMPS)						
PTNC-Emissionen gemittelt 13% O2	#/cm3		5.09E+07	4.99E+07	4.64E+07	4.91E+07 2.33E+06
PTNC-Emissionen normiert Atm	#/mn3		5.15E+13	4.94E+13	4.57E+13	4.89E+13 2.93E+12
PTNC-Emissionen 13%normiert	#/mn3		4.25E+13	4.16E+13	3.88E+13	4.10E+13 1.95E+12
PTNC-Emissionsfaktor Brst trocken	#/kg		5.21E+20	5.10E+20	4.75E+20	5.02E+20 2.39E+19
PTNC-Emissionsfaktor bez. Hu	#/MJ		3.12E+13	3.05E+13	2.85E+13	3.01E+13 1.43E+12
Partikel Mode						
Partikel PM gemittelt 13% O2	nm		76.7	78.9	75.0	76.87 1.97
PM-Emissionen normiert Atm	kg/m3		2.6E-05	2.7E-05	2.1E-05	0.00 3.31E-06
PM-Emissionen 13%normiert	mg/mn3		27	27	21	24.80 3.50
PM-Emissionsfaktor Brst trocken	mg/mn3		22	23	18	20.77 2.76
PM-Emissionsfaktor bez. Hu	g/kg		0.270	0.278	0.216	0.25 0.03
	mg/MJ		16	17	13	15.24 2.03
Gesamtstaub (TPE)						
	Einheit		Test run 1	Test run 2	Test run 3	Mittelwert Stand.-Abw.
TPE-Emissionen gemittelt	mg/mn3		37.27	68.41	32.53	46.07 19.49
TPE-Emissionen 13%normiert	mg/mn3		36.70	56.68	26.72	40.03 15.26
TPE-Emissionsfaktor Brst trocken	g/kg		0.45	0.69	0.33	0.49 0.19
TPE-Emissionsfaktor bez. Hu	mg/MJ		26.93	41.59	19.60	29.37 11.19

Anlage Nr. 17, (Vollast 100%), Fortsetzung

SMPS vor Abgaskondensation, Mittelwerte von jeweils 10 Scans



SMPS nach Abgaskondensation, Mittelwerte von jeweils 10 Scans



Anlage Nr. 17 (Teillast 60%)

SMPS-Messung vor Abgaskondensation, TPE vor Abgaskondensation, Gasanalyse nach Abgaskondensation

Versuchsbezeichnung

Datum	20.10.2002
Messbeginn	10:43:00
Messende	12:45:00

Versuchsumgebung

Umgebunstemperatur	°C	36
Umgebungsdruck	hPa	956
Rel. Luftfeuchtigkeit	%	20

Emissionen	Einheit
-------------------	---------

Kohlenmonoxid

Kohlenmonoxid gemittelt	ppmv	1.32
CO-Emissionen 13%normiert	mg/mn3	1.91
CO-Emissionsfaktor Brst trocken	g/kg	0.02
CO Emissionsfaktor bez. Hu	mg/MJ	1.40

Stickoxide

NOx-Emissionen gemittelt	ppmv	8.4
NOx-Emissionen 13%normiert	mg/mn3	20.1
NOx-Emissionsfaktor Brst trocken	g/kg	0.2
NOx-Emissionsfaktor bez. Hu	mg/MJ	14.8
Verluste d. abgeführte Wärme im Abgas	%	8.4
Verluste d. geb. Wärme im Abgas	%	0.0
Verluste durch Rostdurchfall	%	0.0
mittl. Gesamt-Wirkungsgrad bez. Hu	%	91.6

Energiebilanz**Feuerungstechnische Daten**

Abgastemp gemittelt	°C	46.1
Luftzahl	-	3.0
mittlerer CO2-Wert	Vol%	6.7

Anlage Nr. 17 (Teillast 60%), Fortsetzung

SMPS-Messung vor Abgaskondensation, TPE vor Abgaskondensation, Gasanalyse nach Abgaskondensation

Feinpartikel

Gesamtpartikelanzahl (SMPS)	Einheit	Testrun 1	Testrun 2	Testrun 3	Mittelwert	Standard-Abw.			
PTNC-Emissionen gemittelt 13% O ₂	#/cm3	6.69E+07	6.60E+07	4.43E+07	5.91E+07	1.28E+07			
PTNC-Emissionen normiert Atm	#/mn3	7.47E+13	7.48E+13	5.92E+13	6.96E+13	8.98E+12			
PTNC-Emissionen 13%normiert	#/mn3	6.13E+13	6.05E+13	4.06E+13	5.42E+13	1.17E+13			
PTNC-Emissionsfaktor Brst trocken	#/kg	7.51E+20	7.42E+20	4.98E+20	6.64E+20	1.44E+20			
PTNC-Emissionsfaktor bez. Hu	#/MJ	4.50E+13	4.44E+13	2.98E+13	3.97E+13	8.62E+12			
Partikel Mode	nm	78.9	78.0	69.4	75.42	5.24			
Partikel PM gemittelt 13% O ₂	kg/m3	3.3E-05	3.1E-05	2.7E-05	0.00	3.12E-06			
PM-Emissionen normiert Atm	mg/mn3	37	35	36	36.14	1.15			
PM-Emissionen 13%normiert	mg/mn3	31	28	25	27.90	2.86			
PM-Emissionsfaktor Brst trocken	g/kg	0.374	0.347	0.305	0.34	0.04			
PM-Emissionsfaktor bez. Hu	mg/MJ	22	21	18	20.47	2.10			
Gesamtstaub (TPE)	Einheit	Test run 1	Test run 2	Test run 3	Test run 4	Test run 5	Test run 6	Mittelwert	Stand.-Abw.
TPE-Emissionen gemittelt	mg/mn3	87.77	96.35	93.97	115.38	107.84	98.62	92.70	9.99
TPE-Emissionen 13%normiert	mg/mn3	72.40	78.42	64.21	89.95	87.56	83.09	71.68	9.72
TPE-Emissionsfaktor Brst trocken	g/kg	0.89	0.96	0.79	1.10	1.07	1.02	0.88	0.12
TPE-Emissionsfaktor bez. Hu	mg/MJ	53.12	57.54	47.11	66.00	64.24	60.96	52.59	7.13

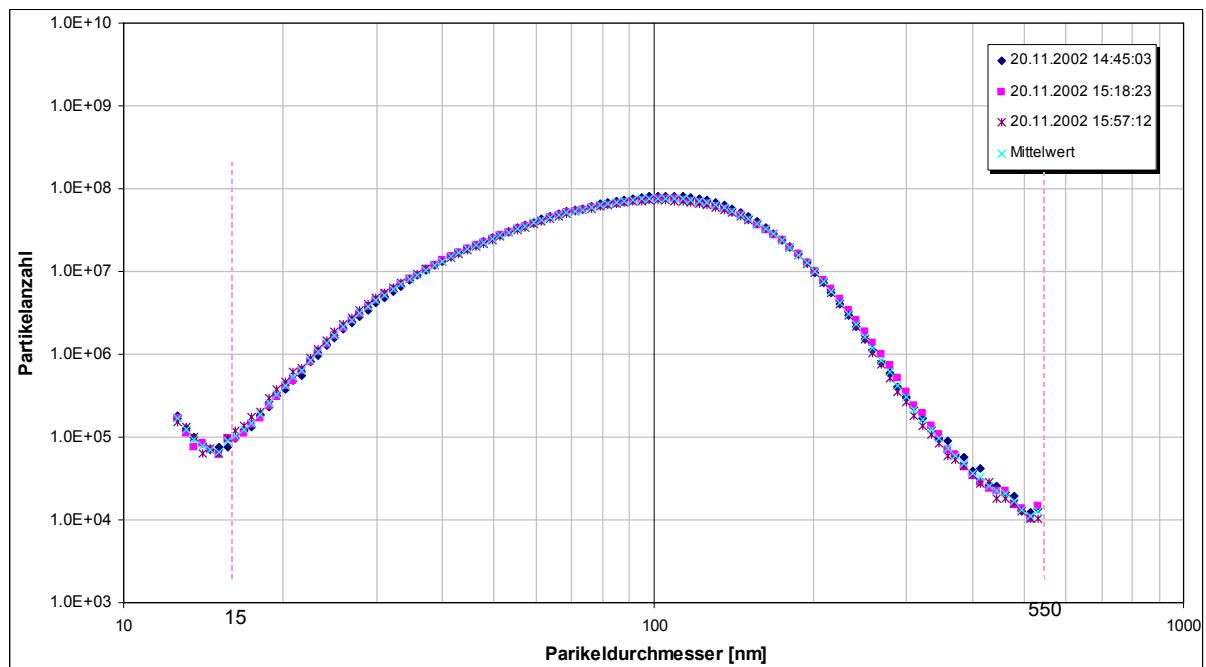
Anlage Nr. 17 (Teillast 60%), Fortsetzung

SMPS-Messung nach Abgaskondensation, TPE nach Abgaskondensation, Gasanalyse nach Abgaskondensation

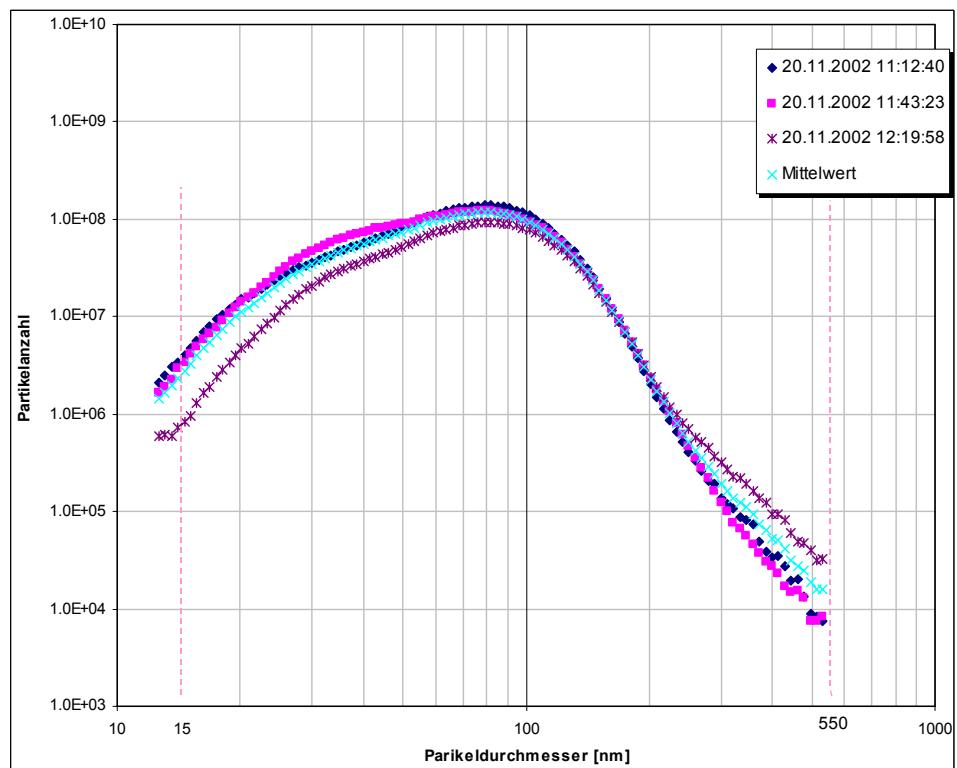
Datum	20.11.2002							
Messbeginn	14:45:00							
Messende	16:22:00							
Versuchsumgebung								
Umgebunstemperatur	°C	35.5	(bezogen Standort Analyse-Geräte)					
Umgebungsdruck	hPa	956						
Rel. Luffeuchtigkeit	%	20						
Emissionen								
Kohlenmonoxid								
Kohlenmonoxid gemittelt	ppmv	1						
CO-Emissionen 13%normiert	mg/mn3	1						
CO-Emissionsfaktor Brst trocken	g/kg	0.012						
CO Emissionsfaktor bez. Hu	mg/MJ	1						
Stickoxide								
NOx-Emissionen gemittelt	ppmv	0						
NOx-Emissionen 13%normiert	mg/mn3	0						
NOx-Emissionsfaktor Brst trocken	g/kg	0.000						
NOx-Emissionsfaktor bez. Hu	mg/MJ	0						
Energiebilanz								
Verluste d. abgeführte Wärme im Abgas	%	1.5						
Verluste d. geb. Wärme im Abgas	%	0.00						
Verluste durch Rostdurchfall	%	0.0						
mittl. Gesamt-Wirkungsgrad bez. Hu	%	98.5						
Feuerungstechnische Daten								
Abgastemp gemittelt	°C	44.8						
Luftzahl	-	2.113						
mittlerer CO2-Wert	Vol%	9.62						
Feinpartikel								
Gesamtpartikelanzahl (SMPS)	Dimensions	Testrun 1	Testrun 2	Testrun 3	Mittelwert	Stand.-Abw.		
PTNC-Emissionen gemittelt 13% O2	#/cm3	3.61E+07	3.42E+07	3.34E+07	3.46E+07	1.39E+06		
PTNC-Emissionen normiert Atm	#/mn3	3.86E+13	3.51E+13	3.32E+13	3.56E+13	2.75E+12		
PTNC-Emissionen 13%normiert	#/mn3	3.02E+13	2.85E+13	2.79E+13	2.89E+13	1.16E+12		
PTNC-Emissionsfaktor Brst trocken	#/kg	3.69E+20	3.50E+20	3.42E+20	3.54E+20	1.43E+19		
PTNC-Emissionsfaktor bez. Hu	#/MJ	2.21E+13	2.09E+13	2.05E+13	2.12E+13	8.53E+11		
Partikel Mode	nm	105.4	100.9	99.2	101.83	3.19		
Partikel PM gemittelt 13% O2	kg/m3	4.3E-05	4.1E-05	3.9E-05	0.00	0.00		
PM-Emissionen normiert Atm	mg/mn3	46	42	39	42.33	3.23		
PM-Emissionen 13%normiert	mg/mn3	36	34	33	34.29	1.35		
PM-Emissionsfaktor Brst trocken	g/kg	0.437	0.419	0.404	0.42	0.02		
PM-Emissionsfaktor bez. Hu	mg/MJ	26	25	24	25.16	0.99		
Gesamtstaub (TPE)	Einheit	Test run 1	Test run 2	Mittelwert	Stand.-Abw.			
TPE-Emissionen gemittelt	mg/mn3	30.94	36.85	33.90	2.95			
TPE-Emissionen 13%normiert	mg/mn3	23.87	29.72	26.79	2.93			
TPE-Emissionsfaktor Brst trocken	g/kg	0.29	0.36	0.33	0.04			
TPE-Emissionsfaktor bez. Hu	mg/MJ	17.51	21.81	19.66	2.15			

Anlage Nr. 17 (Teillast 60%), Fortsetzung

SMPS vor Abgaskondensation, Mittelwerte von jeweils 10 Scans



SMPS vor Abgaskondensation, Mittelwerte von jeweils 10 Scans



Anlage Nr. 17, Fortsetzung**Betriebskosten**

Investitionskosten inkl. Planungskosten		Kapitalkosten Zinssatz 5%	
Filtersystem inkl. Entschwadung	CHF 575'000.-	Nutzungsdauer 20 Jahre	CHF 46'115.-
Raumbedarf \geq CHF 300.-/m ³ $m^3 = 0.04 \times \text{Kesselleistung}$	CHF 72'000.-	Nutzungsdauer 40 Jahre	CHF 4'197.-
		Wartungskosten 8 Manntage	CHF 3'200.-
		Unterhaltskosten	CHF 2'000.-
		Hilfsenergiekosten 2'000 Nennleistungsstunde 4'000 Nennleistungsstunde	CHF 20'000.- CHF 36'000.-
spezifischen Filterkosten in CHF/MWh _{produzierter Wärme} bei			
2'000 Nennleistungsstunden Anteil Kapitalkosten/Betriebskosten 67/33%			CHF 6.3/MWh
4'000 Nennleistungsstunden Anteil Kapitalkosten/Betriebskosten 55/45%			CHF 3.8/MWh

Bezugswert: Kesselleistung 6000 kW

Wartungsaufwand: Reinigung, Störungsbehebung und Kontrolle

Unterhaltsaufwand: Ersatz Anlagenkomponenten, Service

Zusatznutzen: Erhöhung des Jahresnutzungsgrades um 10 – 11%

Anlage Nr. 18

Gasanalyse nach Abgaskondensation, allgemeine feuerungstechnische Daten für gesamte Messdauer

Versuchsbeschreibung

Messobjekt	Schnitzel-Kessel, Vorschubrost	
Art des Abscheiders	Abgaskondensation	
Anlagenbeschreibung (Nennleistung)	800 kW, Fernwärme, Wasser	
Leistung in kW (am Messtag)	530	

Versuchsbezeichnung

Datum	10.12.2002	
Messbeginn	13:01:00	
Messende	19:43:00	
Messdauer	04:42:00	

Versuchsumgebung

Umgebunstemperatur (aussen)	°C	0
Umgebungsdruck	hPa	959
Rel. Luftfeuchtigkeit	%	40

Prüfbrennstoff

Prüfbrennstoffart	Tanne	
Prüfbrennstoffmasse	kg	300
Wassergehalt atro	mass%	90
Heizwert (unterer) Brennstoff	kJ/kg	19200
Heizwert Hu Brstfeucht	kJ/kg	8921

Kohlenmonoxid

Kohlenmonoxid gemittelt	ppmv	21
CO-Emissionen 13%normiert	mg/mn3	20
CO-Emissionsfaktor Brst trocken	g/kg	0.239
CO Emissionsfaktor bez. Hu	mg/MJ	14

Stickoxide

NOx-Emissionen gemittelt	ppmv	35
NOx-Emissionen 13%normiert	mg/mn3	53
NOx-Emissionsfaktor Brst trocken	g/kg	0.647
NOx-Emissionsfaktor bez. Hu	mg/MJ	38

Energiebilanz

Verluste d. abgeführte Wärme im Abgas	%	5.0
Verluste d. geb. Wärme im Abgas	%	0.01
Verluste durch Rostdurchfall	%	0.0
mittl. Gesamt-Wirkungsgrad bez. Hu	%	95.0

Feuerungstechnische Daten

Abgastemp gemittelt	°C	232.2	55.2 (nach Abgaskond.)
Luftzahl	-	1.929	
mittlerer CO2-Wert	Vol%	10.54	

Anlage Nr. 18, Fortsetzung

SMPS-Messung vor Abgaskondensation, TPE vor Abgaskondensation, Gasanalyse nach Abgaskondensation

Feinpartikel	Einheit	Testrun 1	Testrun 2	Testrun 3	Mittelwert	tand.-Abw.
Gesamtpartikelanzahl (SMPS)						
PTNC-Emissionen gemittelt 13% O ₂	#/cm ³	3.80E+07	3.09E+07	2.22E+07	3.04E+07	7.88E+06
PTNC-Emissionen normiert Atm	#/m ³	6.40E+13	4.36E+13	3.00E+13	4.59E+13	1.71E+13
PTNC-Emissionen 13%normiert	#/m ³	3.60E+13	2.92E+13	2.11E+13	2.88E+13	7.46E+12
PTNC-Emissionsfaktor Brst trocken	#/kg	4.41E+20	3.58E+20	2.58E+20	3.52E+20	9.14E+19
PTNC-Emissionsfaktor bez. Hu	#/MJ	2.60E+13	2.11E+13	1.52E+13	2.08E+13	5.39E+12
Partikel Mode						
Partikel PM gemittelt 13% O ₂	nm	89.9	80.2	79.5	83.18	5.80E+00
PM-Emissionen normiert Atm	kg/m ³	3.1E-05	2.0E-05	1.4E-05	0.00	0.00
PM-Emissionen 13%normiert	mg/m ³	52	28	19	32.87	16.92
PM-Emissionsfaktor Brst trocken	g/kg	29	19	13	20.36	7.96
PM-Emissionsfaktor bez. Hu	mg/MJ	0.356	0.227	0.165	0.25	0.10
		21	13	10	14.72	5.75
Gesamtstaub (TPE)						
TPE-Emissionen gemittelt	mg/m ³	166.23	98.89	126.65	124.30	164.14
TPE-Emissionen 13%normiert	mg/m³	93.49	66.53	89.88	106.30	92.67
TPE-Emissionsfaktor Brst trocken	g/kg	1.15	0.82	1.10	1.30	1.14
TPE-Emissionsfaktor bez. Hu	mg/MJ	67.58	48.10	64.97	76.84	66.99
					80.00	67.41
						11.19

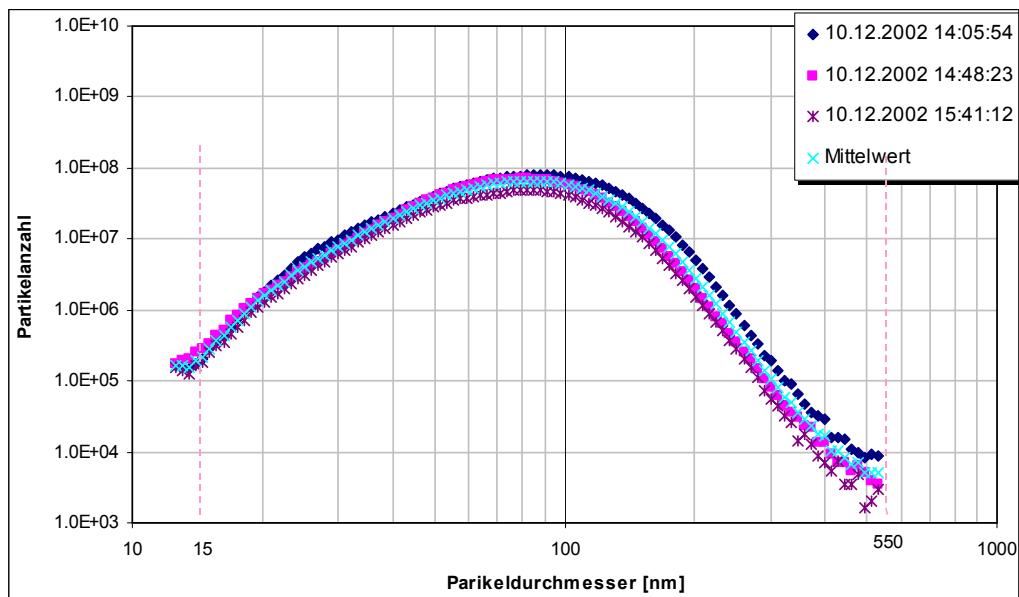
Anlage Nr. 18, Fortsetzung

SMPS-Messung nach Abgaskondensation, TPE nach Abgaskondensation, Gasanalyse nach Abgaskondensation

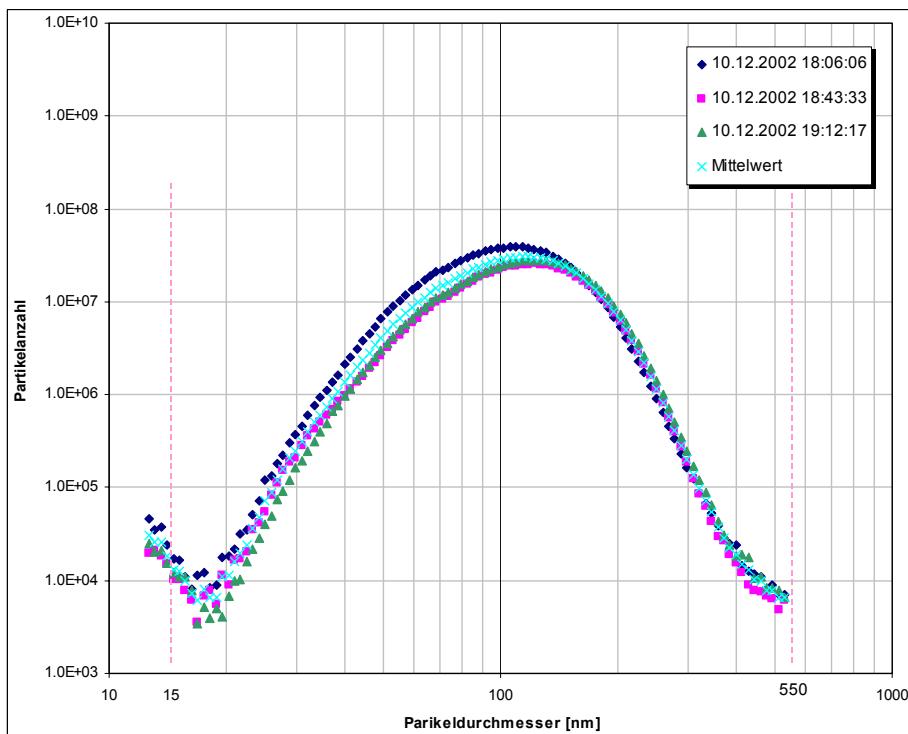
Feinpartikel	Einheit	Testrun 1	Testrun 2	Testrun 3	Mittelwert	Stand.-Abw.
Gesamtpartikelanzahl (SMPS)						
PTNC-Emissionen gemittelt 13% O ₂	#/cm3	1.54E+07	9.94E+06	1.11E+07	1.22E+07	2.90E+06
PTNC-Emissionen normiert Atm	#/mn3	1.71E+13	1.67E+13	1.82E+13	1.73E+13	8.09E+11
PTNC-Emissionen 13%normiert	#/mn3	1.46E+13	9.41E+12	1.05E+13	1.15E+13	2.75E+12
PTNC-Emissionsfaktor Brst trocken	#/kg	1.79E+20	1.15E+20	1.28E+20	1.41E+20	3.37E+19
PTNC-Emissionsfaktor bez. Hu	#/MJ	1.06E+13	6.80E+12	7.58E+12	8.32E+12	1.99E+12
Partikel Mode	nm	109.9	121.7	122.9	118.13	7.18
Partikel PM gemittelt 13% O ₂	kg/m3	2.1E-05	1.8E-05	2.1E-05	0.00	1.80E-06
PM-Emissionen normiert Atm	mg/mn3	24	30	34	29.34	5.25
PM-Emissionen 13%normiert	mg/mn3	20	17	20	18.97	1.71
PM-Emissionsfaktor Brst trocken	g/kg	0.248	0.209	0.241	0.23	0.02
PM-Emissionsfaktor bez. Hu	mg/MJ	15	12	14	13.71	1.23
Gesamtstaub (TPE)						
TPE-Emissionen gemittelt	mg/mn3	124.30	164.14	193.16	160.53	
TPE-Emissionen 13%normiert	mg/mn3	106.30	92.67	110.67	103.21	
TPE-Emissionsfaktor Brst trocken	g/kg	1.30	1.14	1.36	1.26	
TPE-Emissionsfaktor bez. Hu	mg/MJ	76.84	66.99	80.00	74.61	

Anlage Nr. 18, *Fortsetzung*

SMPS vor Abgaskondensation, Mittelwerte von jeweils 10 Scans



SMPS nach Abgaskondensation, Mittelwerte von jeweils 10 Scans



Die scheinbar wieder ansteigenden Anzahlkonzentrationen unterhalb 20nm sind ein Messfehler wegen der relativ geringen „downscan“-Zeit von 30 Sekunden sein.

Anlage Nr. 18, Fortsetzung

Betriebskosten

Investitionskosten inkl. Planungskosten		Kapitalkosten Zinssatz 5%	
Filtersystem inkl. Neutralisation	CHF 144'000.-	Nutzungsdauer 20 Jahre	CHF 11'549.-
Raumbedarf \geq CHF 400.-/m ³ $m^3 = 0.04 \times \text{Kesselleistung}$	CHF 12'800.-	Nutzungsdauer 40 Jahre	CHF 746.-
		Wartungskosten 3 Manntage	CHF 1'200.-
		Unterhaltskosten	CHF 500.-
		Hilfsenergiekosten 2'000 Nennleistungsstunde 4'000 Nennleistungsstunde	CHF 1'400.- CHF 2.400.-
spezifischen Filterkosten in CHF/MWh _{produzierter Wärme} bei			
2'000 Nennleistungsstunden Anteil Kapitalkosten/Betriebskosten 80/20%			CHF 9.6/MWh
4'000 Nennleistungsstunden Anteil Kapitalkosten/Betriebskosten 75/25%			CHF 5.1/MWh

Bezugswert: Kesselleistung 800 kW

Wartungsaufwand: Reinigung, Störungsbehebung und Kontrolle

Unterhaltsaufwand: Ersatz Anlagenkomponenten, Service

Abgastemperatur nach Abgaskondensationsanlage: 45 – 50°C

Zusatznutzen: Erhöhung des Jahresnutzungsgrades um 20 %

Anlage Nr. 19

Gasanalyse nach Elektrofilter, allgemeine feuerungstechnische Daten für gesamte Messdauer

Versuchsbeschreibung

Projektname	FMK III
Messobjekt	Schnitzel-Kessel, Vorschubrost
Art des Abscheiders	Elektrostatisch
Anlagenbeschreibung (Nennleistung)	1800 kW, Fernwärmeverbund, Brauchwasser
Leistung (am Messtag)	kW 1800

Versuchsbezeichnung

Datum	08.01.2003
Messbeginn	11:05:00
Messende	15:18:00
Messdauer	04:13:00

Versuchsumgebung

	Einheit	
Umgebunstemperatur	°C	11
Umgebungsdruck	hPa	966
Rel. Luftfeuchtigkeit	%	50

Emissionen**Kohlenmonoxid**

Kohlenmonoxid gemittelt	ppmv	1'964
CO-Emissionen 13%normiert	mg/mn3	2'072
CO-Emissionsfaktor Brst trocken	g/kg	23.942
CO Emissionsfaktor bez. Hu	mg/MJ	1'416

Stickoxide

NOx-Emissionen gemittelt	ppmv	211
NOx-Emissionen 13%normiert	mg/mn3	367
NOx-Emissionsfaktor Brst trocken	g/kg	4.236
NOx-Emissionsfaktor bez. Hu	mg/MJ	251

Energiebilanz

Verluste d. abgeführte Wärme im Abgas	%	17.0
Verluste d. geb. Wärme im Abgas	%	1.19
Verluste durch Rostdurchfall	%	0.0
mittl. Gesamt-Wirkungsgrad bez. Hu	%	81.8

Feuerungstechnische Daten

Abgastemp gemittelt	°C	201.0
Luftzahl	-	2.190
mittlerer CO2-Wert	Vol%	9.19

Anlage Nr. 19, Fortsetzung

SMPS-Messung vor Elektrofilter, TPE vor Elektrofilter, Gasanalyse nach Elektrofilter

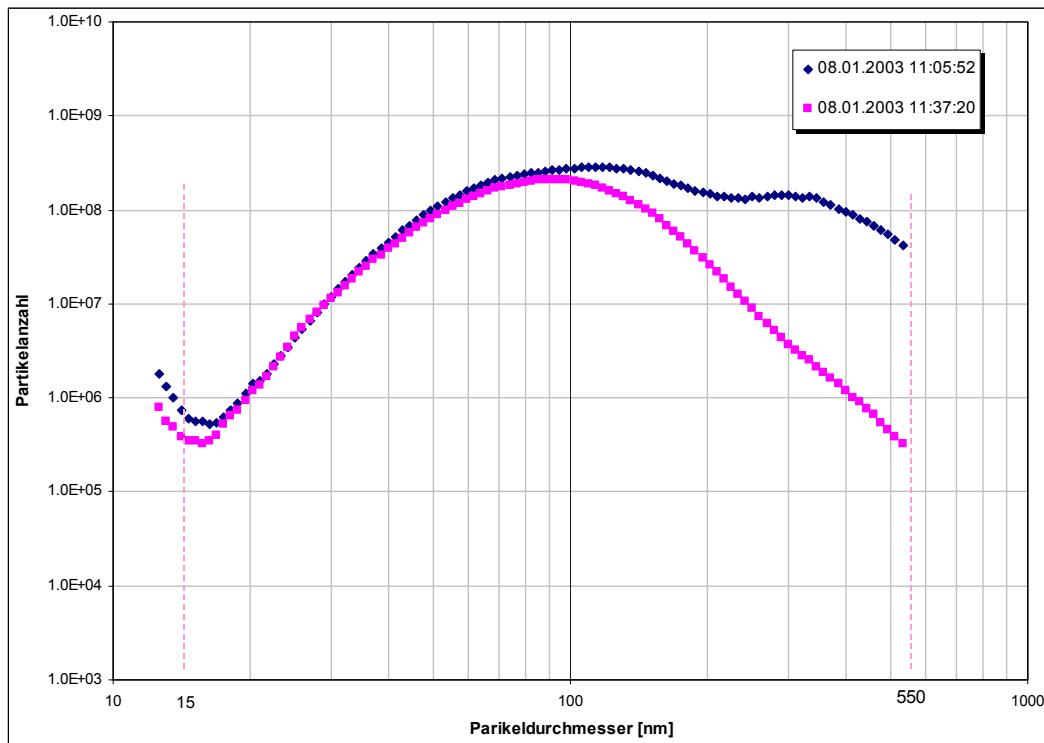
Feinpartikel	Einheit	Testrun 1	Testrun 2	Mittelwert	
Gesamtpartikelanzahl (SMPS)		Run 1 und 2 weiterverwertet (von run1 sind 3...9 unglaublich*)			
PTNC-Emissionen gemittelt 13% O ₂	#/cm ³	1.92E+08	9.60E+07	1.44E+08	
PTNC-Emissionen normiert Atm	#/mn ³	2.09E+14	1.40E+14	1.74E+14	
PTNC-Emissionen 13%normiert	#/mn ³	1.76E+14	8.80E+13	1.32E+14	
PTNC-Emissionsfaktor Brst trocken	#/kg	2.05E+21	1.02E+21	1.54E+21	
PTNC-Emissionsfaktor bez. Hu	#/MJ	1.21E+14	6.05E+13	9.10E+13	
Partikel Mode	nm	119.6	106.0	112.81	
Partikel PM gemittelt 13% O ₂	kg/m ³	1.7E-03	1.2E-04	0.00	
PM-Emissionen normiert Atm	mg/mn ³	1814	176	994.54	
PM-Emissionen 13%normiert	mg/mn ³	1534	110	822.04	
PM-Emissionsfaktor Brst trocken	g/kg	17.855	1.282	9.57	
PM-Emissionsfaktor bez. Hu	mg/MJ	1056	76	566.02	
(*) durch die vielen Wechsel der Feuerung zwischen Vollast und Gluternhaltung					
Gesamtstaub (TPE)	Einheit	Test run 1	Test run 2	Test run 3	Test run 4
TPE-Emissionen gemittelt	mg/mn ³	271.63	332.15	169.29	265.81
TPE-Emissionen 13%normiert	mg/mn ³	231.14	209.22	119.22	226.86
TPE-Emissionsfaktor Brst trocken	g/kg	2.69	2.43	1.39	2.64
TPE-Emissionsfaktor bez. Hu	mg/MJ	159.18	143.72	81.94	156.11
					Mittelwert Stand.-Abw.
					259.72
					67.34
					196.61
					52.46
					0.61
					135.24
					36.16

SMPS-Messung nach Abgaskondensation, TPE nach Filter, Gasanalyse nach Abgaskondensation

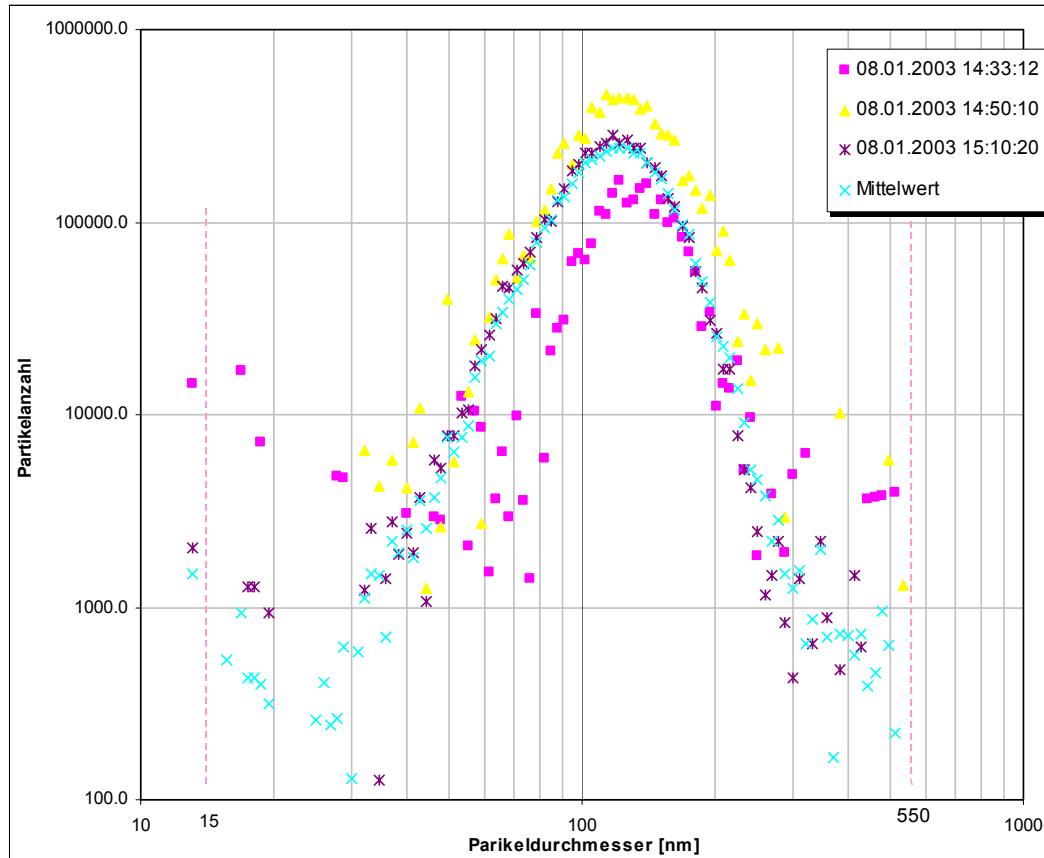
Feinpartikel	von Run 4 bis 6 je nur Samples 0...6 verarbeitet (weil der Kessel wiederholt pausierte)					
Gesamtpartikelanzahl (SMPS)	Einheit	Testrun 1	Testrun 2	Testrun 3	Mittelwert	Stand.-Abw.
PTNC-Emissionen gemittelt 13% O ₂	#/cm ³	7.61E+04	6.12E+04	7.73E+04	7.16E+04	8.97E+03
PTNC-Emissionen normiert Atm	#/mn ³	8.03E+10	6.48E+10	9.88E+10	8.13E+10	1.71E+10
PTNC-Emissionen 13%normiert	#/mn ³	6.98E+10	5.61E+10	7.09E+10	6.56E+10	8.23E+09
PTNC-Emissionsfaktor Brst trocken	#/kg	8.12E+17	6.54E+17	8.25E+17	7.63E+17	9.54E+16
PTNC-Emissionsfaktor bez. Hu	#/MJ	4.81E+10	3.87E+10	4.88E+10	4.52E+10	5.65E+09
Partikel Mode	nm	120.5	121.2	124.5	122.08	2.16
Partikel PM gemittelt 13% O ₂	kg/m ³	1.3E-07	1.1E-07	1.6E-07	0.00	0.00
PM-Emissionen normiert Atm	mg/mn ³	0.136	0.121	0.202	0.153	0.043
PM-Emissionen 13%normiert	mg/mn ³	0.118	0.105	0.145	0.123	0.020
PM-Emissionsfaktor Brst trocken	g/kg	0.001	0.001	0.002	0.001	0.000
PM-Emissionsfaktor bez. Hu	mg/MJ	0.081	0.072	0.100	0.084	0.014
Gesamtstaub (TPE)	Einheit	Test run 1	Test run 2	Mittelwert		
TPE-Emissionen gemittelt	mg/mn ³	3.03	1.10	2.07		
TPE-Emissionen 13%normiert	mg/mn ³	2.33	0.86	1.60		
TPE-Emissionsfaktor Brst trocken	g/kg	0.03	0.01	0.02		
TPE-Emissionsfaktor bez. Hu	mg/MJ	1.60	0.59	1.10		

Anlage Nr. 19, *Fortsetzung*

SMPS Elektrofilter, Mittelwerte von jeweils 10 Scans



SMPS nach Elektrofilter, Mittelwerte von jeweils 6 Scans



Anlage Nr. 19, Fortsetzung

Betriebskosten

Investitionskosten inkl. Planungskosten		Kapitalkosten Zinssatz 5%	
Filtersystem	CHF 400'000.-	Nutzungsdauer 15 Jahre*	CHF 38'520.-
Raumbedarf \geq CHF 300.-/m ³ $m^3 = 0.1 \times \text{Kesselleistung}$	CHF 54'000.-	Nutzungsdauer 30 Jahre	CHF 3'515.-
		Wartungskosten 4 Manntage	CHF 1'600.-
		Unterhaltskosten	CHF 3'000.-
		Hilfsenergiekosten 2'000 Nennleistungsstunde	CHF 2'700.-
		4'000 Nennleistungsstunde	CHF 4'500.-
spezifischen Filterkosten in CHF/MWh _{produzierter Wärme} bei			
2'000 Nennleistungsstunden Anteil Kapitalkosten/Betriebskosten 85/15%			CHF 13.7/MWh
4'000 Nennleistungsstunden Anteil Kapitalkosten/Betriebskosten 82/18%			CHF 7.1/MWh

*Angabe Anlagebetreiber

Bezugswert: Kesselleistung 1800 kW

Wartungsaufwand: Reinigung und Kontrolle

Unterhaltsaufwand: Ersatz Isolatoren und Austragungsschnecke, Service alle 5 Jahre

Anlage Nr. 20

Gasanalyse nach Elektrofilter, allgemeine feuerungstechnische Daten für gesamte Messdauer

Versuchsbeschreibung

Projektname	FMK III
Messobjekt	Schnitzel-Kessel
Typ	Vorschub-Rost, Prozesswärme und Heizung
Leistung	2400 (am Messtag variabel)

Versuchsbezeichnung

Datum	07.01.2003
Messbeginn	11:20:00
Messende	16:30:00
Messdauer	05:10:00

Versuchsumgebung

	Einheit	
Umgebunstemperatur	°C	22
Umgebunsdruck	hPa	935
Rel. Luftfeuchtigkeit	%	40

Emissionen**Abgastemperatur**

Abgastemp gemittelt	°C	150.8
---------------------	----	--------------

Kohlenmonoxid

Kohlenmonoxid gemittelt	ppmv	195
CO-Emissionen 13%normiert	mg/mn3	404
CO-Emissionsfaktor Brst trocken	g/kg	4.695
CO Emissionsfaktor bez. Hu	mg/MJ	276

Stickoxide

NOx-Emissionen gemittelt	ppmv	72
NOx-Emissionen 13%normiert	mg/mn3	243
NOx-Emissionsfaktor Brst trocken	g/kg	2.829
NOx-Emissionsfaktor bez. Hu	mg/MJ	166

Energiebilanz

Verluste d. abgeführte Wärme im Abgas	%	21.1
Verluste d. geb. Wärme im Abgas	%	0.23
Verluste durch Rostdurchfall	%	0.0
mittl. Gesamt-Wirkungsgrad bez. Hu	%	78.6

Feuerungstechnische Daten

Abgastemp gemittelt	°C	150.8
Luftzahl	-	4.322
mittlerer CO2-Wert	Vol%	4.74

Anlage Nr. 20, Fortsetzung

SMPS-Messung vor Elektrofilter, TPE vor Elektrofilter, Gasanalyse nach Elektrofilter

Feinpartikel

Gesamtpartikelanzahl (SMPS)	Einheit	Testrun 1	Testrun 2	Testrun 3	Mittelwert	Stand.-Abw.
PTNC-Emissionen gemittelt 13% O ₂	#/cm ³	2.61E+08	2.29E+08	2.22E+08	2.37E+08	20828318
PTNC-Emissionen normiert Atm	#/m ³	1.35E+14	1.04E+14	1.48E+14	1.29E+14	2.239E+13
PTNC-Emissionen 13%normiert	#/m ³	2.23E+14	1.95E+14	1.89E+14	2.02E+14	1.779E+13
PTNC-Emissionsfaktor Brst trocken	#/kg	2.59E+21	2.27E+21	2.20E+21	2.36E+21	2.071E+20
PTNC-Emissionsfaktor bez. Hu	#/MJ	1.52E+14	1.33E+14	1.29E+14	1.38E+14	1.216E+13
Partikel Mode	nm	61.0	75.8	82.5	73.11	10.980447
Partikel PM gemittelt 13% O ₂	kg/m ³	1.1E-04	1.4E-04	1.4E-04	0.00	1.726E-05
PM-Emissionen normiert Atm	mg/m ³	57	64	92	70.69	18.559273
PM-Emissionen 13%normiert	mg/m ³	93	120	118	110.10	14.740791
PM-Emissionsfaktor Brst trocken	g/kg	1.084	1.390	1.369	1.28	0.1712659
PM-Emissionsfaktor bez. Hu	mg/MJ	64	82	80	75.22	10.056718

Gesamtstaub (TPE)

	Einheit	Test run 1	Test run 2	Test run 3	Test run 4	Test run 5	Test run 6	Mittelwert	Stand.-Abw.
TPE-Emissionen gemittelt	mg/m ³	181.72	227.31	309.97	154.02	165.15	172.69	201.81	58.70
TPE-Emissionen 13%normiert	mg/m ³	300.78	421.57	396.30	243.91	273.67	267.10	317.22	73.75
TPE-Emissionsfaktor Brst trocken	g/kg	3.50	4.90	4.61	2.83	3.18	3.11	3.69	0.86
TPE-Emissionsfaktor bez. Hu	mg/MJ	205.51	287.78	270.93	166.44	186.89	182.36	216.65	50.42

Anlage Nr. 20, Fortsetzung

SMPS-Messung nach Elektrofilter, TPE nach Elektrofilter, Gasanalyse nach Elektrofilter

Feinpartikel

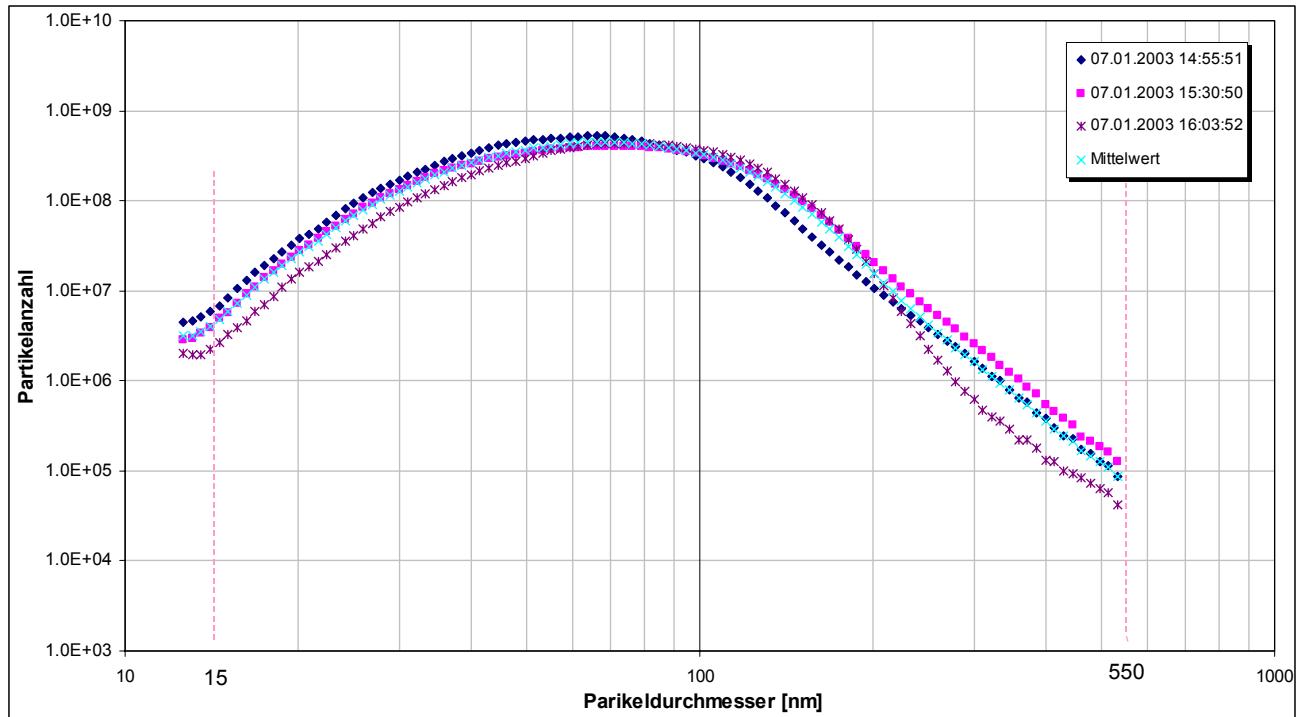
Gesamtpartikelanzahl (SMPS)	Einheit	Testrun 1	Testrun 2	Testrun 3	Mittelwert	Stand.-Abw.
PTNC-Emissionen gemittelt 13% O ₂	#/cm ³	5.84E+05	2.19E+06	8.12E+05	1.20E+06	868519.39
PTNC-Emissionen normiert Atm	#/m ³	3.13E+11	1.13E+12	4.48E+11	6.32E+11	4.404E+11
PTNC-Emissionen 13%normiert	#/m ³	4.99E+11	1.87E+12	6.94E+11	1.02E+12	7.419E+11
PTNC-Emissionsfaktor Brst trocken	#/kg	5.80E+18	2.18E+19	8.07E+18	1.19E+19	8.631E+18
PTNC-Emissionsfaktor bez. Hu	#/MJ	3.40E+11	1.28E+12	4.74E+11	6.97E+11	5.068E+11
Partikel Mode	nm	132.7	93.4	134.5	120.16	23.235174
Partikel PM gemittelt 13% O ₂	kg/m ³	2.9E-06	2.9E-06	2.6E-06	0.00	1.918E-07
PM-Emissionen normiert Atm	mg/m ³	2	1	1	1.49	0.0693046
PM-Emissionen 13%normiert	mg/m ³	2	2	2	2.38	0.1638019
PM-Emissionsfaktor Brst trocken	g/kg	0.029	0.029	0.025	0.03	0.001902
PM-Emissionsfaktor bez. Hu	mg/MJ	2	2	1	1.62	0.1116847

Gesamtstaub (TPE)

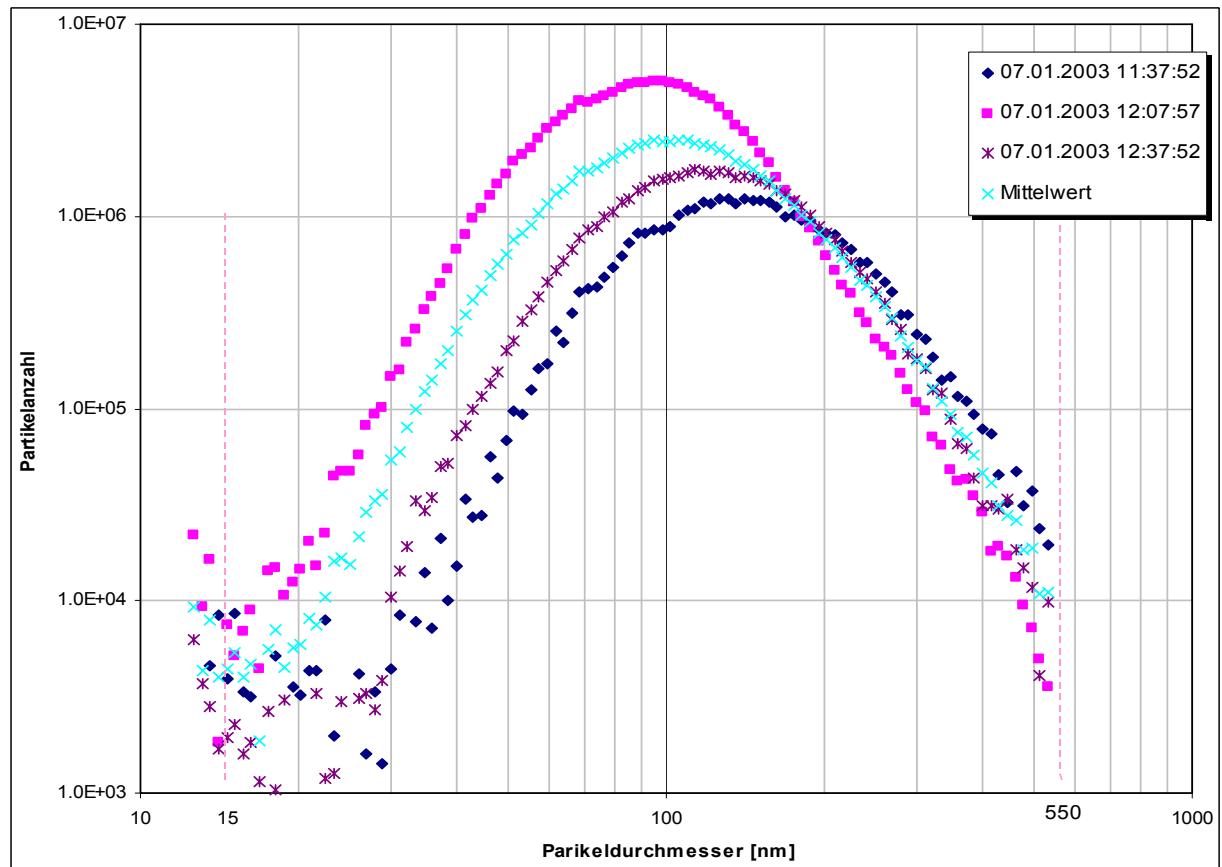
	Einheit	Test run 1	Test run 2	Mittelwerte	Stand.-Abw.
TPE-Emissionen gemittelt	mg/m ³	4.91	7.08	5.99	1.08
TPE-Emissionen 13%normiert	mg/m ³	7.78	10.93	9.35	1.58
TPE-Emissionsfaktor Brst trocken	g/kg	0.09	0.13	0.11	0.02
TPE-Emissionsfaktor bez. Hu	mg/MJ	5.31	7.47	6.39	1.08

Anlage Nr. 20, *Fortsetzung*

SMPS vor Elektrofilter, Mittelwerte von jeweils 10 Scans



SMPS nach Elektrofilter, Mittelwerte von jeweils 10 Scans



Anlage Nr. 20, Fortsetzung

Betriebskosten

Investitionskosten inkl. Planungskosten		Kapitalkosten Zinssatz 5%	
Filtersystem	CHF 345'000.-	Nutzungsdauer 20 Jahre	CHF 27'669.-
Raumbedarf à CHF300.-/m ³ m ³ = 0.1 x Kesselleistung	CHF 72'000.-	Nutzungsdauer 40 Jahre	CHF 4'197.-
		Wartungskosten 4 Manntage	CHF 1'600.-
		Unterhaltskosten	CHF 4'000.-
		Hilfsenergiekosten 2'000 Nennleistungsstunde 4'000 Nennleistungsstunde	CHF 2'700.- CHF 4'500.-
spezifischen Filterkosten in CHF/MWh _{produzierter Wärme} bei			
2'000 Nennleistungsstunden Anteil Kapitalkosten/Betriebskosten 79/21%			CHF 8.4/MWh
4'000 Nennleistungsstunden Anteil Kapitalkosten/Betriebskosten 76/24%			CHF 4.4/MWh

Bezugswert: Kesselleistung 2400 kW

Wartungsaufwand: Reinigung (Stäbe abblasen, Grobreinigung innen mit Lanze),
Störungsbehebung und Kontrolle

Unterhaltsaufwand: Ersatz von einem Isolator/Jahr, kein Service

Einschalttemperatur Filtersystem: 130°C

Anlage Nr. 21

SMPS-Messung vor Elektrofilter, TPE vor Elektrofilter, Gasanalyse nach Elektrofilter

Versuchsbeschreibung

Projektname	FMK III
Messobjekt	Schnitzel-Kessel, Vorschubrost
Anlagenbeschreibung, Nennleistung	Prozessdampf für grössere Industrieanlage
Leistung am Messtag	kW 2500

Versuchsbezeichnung

Datum	21.11.2002
Messbeginn	13:00:00
Messende	17:10:00
Messdauer	03:10:00
Messomatfilename	A021121

Versuchsumgebung

Umgebunstemperatur	°C 9
Umgebungsdruck	hPa 958
Rel. Luftfeuchtigkeit	% 80

Brennstoff**Prüfbrennstoff**

Prüfbrennstoffart	Tanne
Prüfbrennstoffmasse	kg 1250
Wassergehalt atro	mass% 50
Heizwert (unterer) Brennstoff	kJ/kg 19200
Heizwert Hu Brstfeucht	kJ/kg 11967

Emissionen**Kohlenmonoxid**

Kohlenmonoxid gemittelt	ppmv 49
CO-Emissionen 13%normiert	mg/mn3 55
CO-Emissionsfaktor Brst trocken	g/kg 0.670
CO Emissionsfaktor bez. Hu	mg/MJ 37

Stickoxide

NOx-Emissionen gemittelt	ppmv 180
NOx-Emissionen 13%normiert	mg/mn3 328
NOx-Emissionsfaktor Brst trocken	g/kg 4.021
NOx-Emissionsfaktor bez. Hu	mg/MJ 224

Energiebilanz

Verluste d. abgeführte Wärme im Abgas	% 16.4
Verluste d. geb. Wärme im Abgas	% 0.03
Verluste durch Rostdurchfall	% 0.0
mittl. Gesamt-Wirkungsgrad bez. Hu	% 83.6

Feuerungstechnische Daten

Abgastemp gemittelt	°C 177.7
Luftzahl	- 2.322
mittlerer CO2-Wert	Vol% 8.75

Anlage Nr. 21, Fortsetzung

SMPS-Messung vor Elektrofilter, TPE vor Elektrofilter, Gasanalyse nach Elektrofilter

Gesamtpartikelanzahl (SMPS)	Einheit	Testrun 1	Testrun 2	Testrun 3	Mittelwert	Stand.-Abw.
PTNC-Emissionen gemittelt 13% O ₂	#/cm ³	1.15E+08	9.70E+07	9.35E+07	1.02E+08	11691928
PTNC-Emissionen normiert Atm	#/m ³	1.22E+14	1.10E+14	1.07E+14	1.13E+14	7.902E+12
PTNC-Emissionen 13%normiert	#/m ³	1.06E+14	8.88E+13	8.56E+13	9.33E+13	1.07E+13
PTNC-Emissionsfaktor Brst trocken	#/kg	1.29E+21	1.09E+21	1.05E+21	1.14E+21	1.312E+20
PTNC-Emissionsfaktor bez. Hu	#/MJ	7.20E+13	6.06E+13	5.84E+13	6.37E+13	7.307E+12
Partikel Mode	nm	82.7	77.6	73.3	77.88	4.74
Partikel PM gemittelt 13% O ₂	kg/m ³	6.7E-05	4.9E-05	4.0E-05	5.19E-05	1.35E-05
PM-Emissionen normiert Atm	mg/m ³	70	55	46	57.24	12.32
PM-Emissionen 13%normiert	mg/m ³	61	45	37	47.53	12.35
PM-Emissionsfaktor Brst trocken	g/kg	0.748	0.548	0.452	0.58	0.15
PM-Emissionsfaktor bez. Hu	mg/MJ	42	31	25	32.44	8.43

Gesamtstaub (TPE)	Einheit	Run3 Filter von falscher Seite her beladen						Mittelwert	Stand.-Abw.
		Test run 1	Test run 2	Test run 3	Test run 4	Test run 5	Test run 6		
TPE-Emissionen gemittelt	mg/m ³	430.81	385.63	289.10	495.09	367.34	371.37	389.89	72.62
TPE-Emissionen 13%normiert	mg/m ³	371.78	313.92	231.06	416.64	316.03	318.03	327.91	57.52
TPE-Emissionsfaktor Brst trocken	g/kg	4.56	3.85	2.83	5.10	3.87	3.90	4.02	0.70
TPE-Emissionsfaktor bez. Hu	mg/MJ	253.78	214.29	157.73	284.40	215.72	217.09	223.83	39.26

Anlage Nr. 21, Fortsetzung

SMPS-Messung nach Elektrofilter, TPE nach Elektrofilter, Gasanalyse nach Elektrofilter

Versuchsbezeichnung

Datum	22.11.2002	
Messbeginn	10:51:00	
Messende	12:41:00	
Messdauer	01:50:00	

Versuchsumgebung

Umgebunstemperatur	°C	10
Umgebungsdruck	hPa	958
Rel. Luftfeuchtigkeit	%	80

Brennstoff**Prüfbrennstoff**

Prüfbrennstoffart		Tanne
Prüfbrennstoffmasse	kg	1250
Wassergehalt atro	mass%	50
Heizwert (unterer) Brennstoff	kJ/kg	19200
Heizwert Hu Brstfeucht	kJ/kg	11967

Emissionen	Einheit
------------	---------

Kohlenmonoxid

Kohlenmonoxid gemittelt	ppmv	10.48
CO-Emissionen 13%normiert	mg/mn3	12.91
CO-Emissionsfaktor Brst trocken	g/kg	0.16
CO Emissionsfaktor bez. Hu	mg/MJ	8.82

Stickoxide

NOx-Emissionen gemittelt	ppmv	181.44
NOx-Emissionen 13%normiert	mg/mn3	313.22
NOx-Emissionsfaktor Brst trocken	g/kg	3.84
NOx-Emissionsfaktor bez. Hu	mg/MJ	213.80

Energiebilanz

Verluste d. abgeführte Wärme im Abgas	%	16.76
Verluste d. geb. Wärme im Abgas	%	0.01
Verluste durch Rostdurchfall	%	0.00
mittl. Gesamt-Wirkungsgrad bez. Hu	%	83.2

Feuerungstechnische Daten

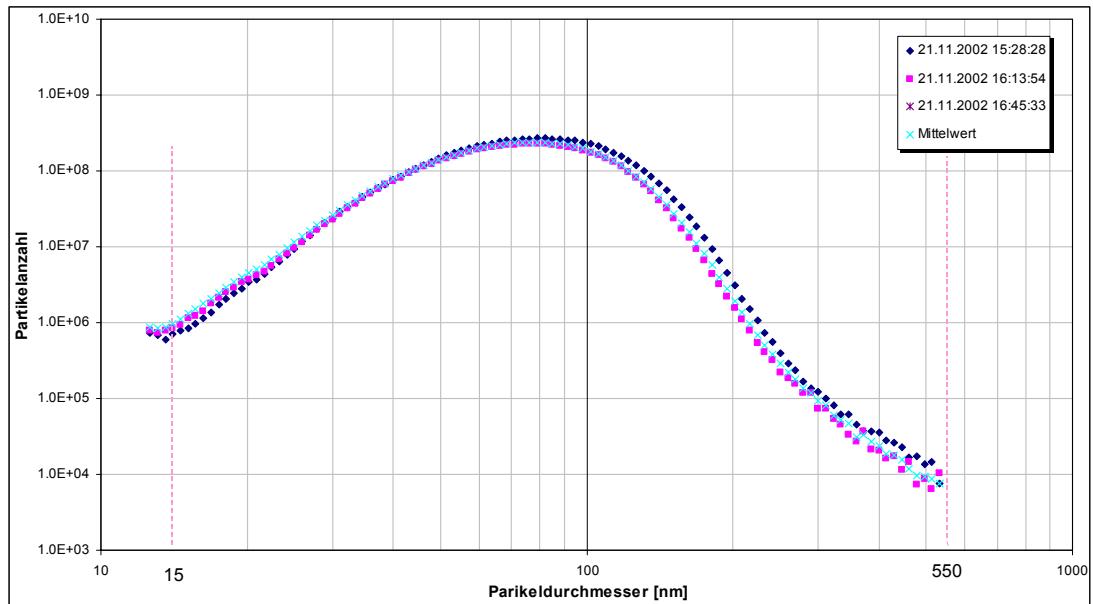
Abgastemp gemittelt	°C	188
Luftzahl	-	2.228
mittlerer CO2-Wert	Vol%	9.25

Feinpartikel

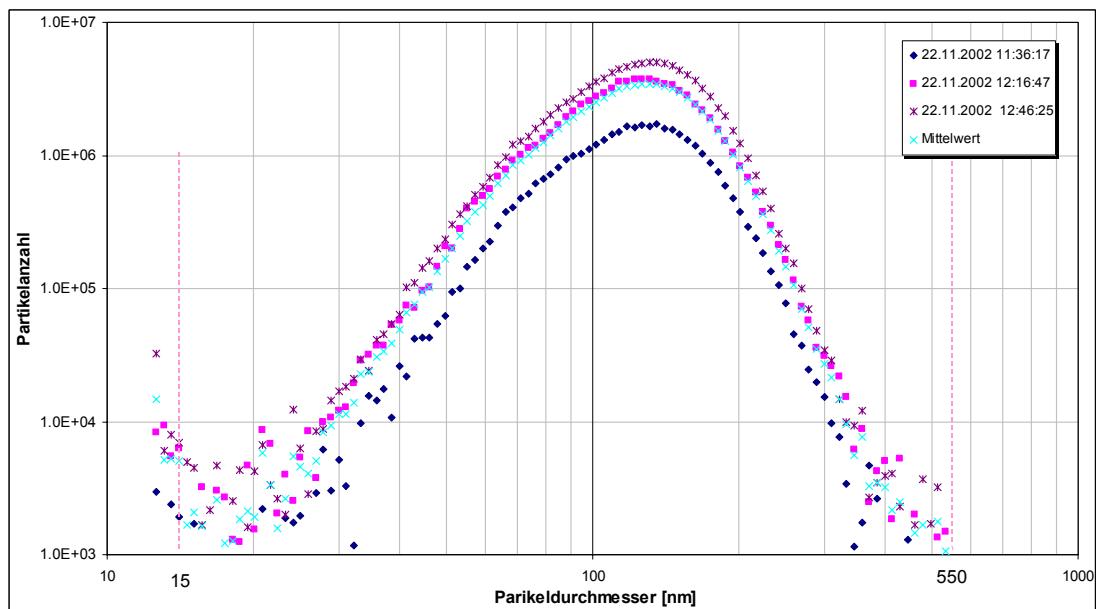
	Einheit	Testrun 1	Testrun 2	Testrun 3	Mittelwert	Stand.-Abw.
Gesamtpartikelanzahl (SMPS)						
PTNC-Emissionen gemittelt 13% O2	#/cm3	569824.3654	6.26E+05	8.43E+05	6.80E+05	1.44E+05
PTNC-Emissionen normiert Atm	#/mn3	6.03722E+11	6.64E+11	7.92E+11	6.87E+11	9.60E+10
PTNC-Emissionen 13%normiert	#/mn3	5.19844E+11	5.71E+11	7.69E+11	6.20E+11	1.32E+11
PTNC-Emissionsfaktor Brst trocken	#/kg	6.36957E+18	7.00E+18	9.42E+18	7.60E+18	1.61E+18
PTNC-Emissionsfaktor bez. Hu	#/MJ	3.54851E+11	3.90E+11	5.25E+11	4.23E+11	8.98E+10
Partikel Mode	nm	128.0	125.2	131.1	128.09	2.96
Partikel PM gemittelt 13% O2	kg/m3	0.00	1.3E-06	1.8E-06	0.00	0.00
PM-Emissionen normiert Atm	mg/mn3	1.23	1.34	1.65	1.41	0.22
PM-Emissionen 13%normiert	mg/mn3	1.06	1.16	1.60	1.27	0.29
PM-Emissionsfaktor Brst trocken	g/kg	0.01	0.014	0.020	0.02	0.00
PM-Emissionsfaktor bez. Hu	mg/MJ	0.73	0.79	1.09	0.87	0.20
Gesamtstaub (TPE)						
TPE-Emissionen gemittelt	mg/mn3	12.21	8.16	10.18		
TPE-Emissionen 13%normiert	mg/mn3	10.40	6.44	8.42		
TPE-Emissionsfaktor Brst trocken	g/kg	0.13	0.08	0.10		
TPE-Emissionsfaktor bez. Hu	mg/MJ	7.10	4.40	5.75		

Anlage Nr. 21, *Fortsetzung*

SMPS-Messung vor Elektrofilter, Mittelwerte von jeweils 10 Scans



SMPS-Messung nach Elektrofilter, Mittelwerte von jeweils 10 Scans



Anlage Nr. 21, Fortsetzung

Betriebskosten

Investitionskosten inkl. Planungskosten		Kapitalkosten Zinssatz 5%	
Filtersystem	CHF 285'000.-	Nutzungsdauer 20 Jahre	CHF 22'857.-
Raumbedarf \geq CHF 300.-/m ³ m ³ = 0.1 x Kesselleistung	Aussenaufstellung	Nutzungsdauer 40 Jahre	CHF 0.-
		Wartungskosten 3 Manntage	CHF 1'200.-
		Unterhaltskosten	CHF 5'000.-
		Hilfsenergiekosten 2'000 Nennleistungsstunde 4'000 Nennleistungsstunde	CHF 1'800.- CHF 3'000.-
spezifischen Filterkosten in CHF/MWh _{produzierter Wärme} bei			
2'000 Nennleistungsstunden Anteil Kapitalkosten/Betriebskosten 74/26%			CHF 6.2/MWh
4'000 Nennleistungsstunden Anteil Kapitalkosten/Betriebskosten 71/29%			CHF 3.2/MWh

Bezugswert: Kesselleistung 2500 kW

Wartungsaufwand: Reinigung

Störungsbehebung und Kontrolle

Unterhaltsaufwand: Ersatz von Isolatoren, Jahresservicevertragsanteil CHF 2'500.-

Einschalttemperatur Filtersystem: 75°C

Anlage Nr. 22

Gasanalyse nach Gewebefilter, allgemeine feuerungstechnische Daten für gesamte Messdauer

Versuchsbeschreibung

Projektname	FMK III
Messobjekt	Schnitzel-Kessel, Vorschub-Rost
Anlagenbeschreibung	Wärmeverbund, Abfall, 600kW
Leistung am Messtag	600

kW

Versuchsbezeichnung

Datum	12.12.2002
Messbeginn	11:00:00
Messende	17:00:00
Messdauer	08:00:00
Messomatfilename	A0212112

Versuchsumgebung

Umgebunstemperatur	°C	0
Umgebungsdruck	hPa	975
Rel. Luftfeuchtigkeit	%	60

Brennstoff**Prüfbrennstoff**

Prüfbrennstoffart		Buche
Prüfbrennstoffmasse	kg	300
Wassergehalt atro	mass%	10
Heizwert (unterer) Brennstoff	kJ/kg	17530
Heizwert Hu Brstfeucht	kJ/kg	15709

Emissionen**Kohlenmonoxid**

Kohlenmonoxid gemittelt	ppmv	2'058
CO-Emissionen 13%normiert	mg/mn3	2'559
CO-Emissionsfaktor Brst trocken	g/kg	29.515
CO Emissionsfaktor bez. Hu	mg/MJ	1'708

Stickoxide

NOx-Emissionen gemittelt	ppmv	15
NOx-Emissionen 13%normiert	mg/mn3	30
NOx-Emissionsfaktor Brst trocken	g/kg	0.346
NOx-Emissionsfaktor bez. Hu	mg/MJ	20

Energiebilanz

Verluste d. abgeführte Wärme im Abgas	%	12.1
Verluste d. geb. Wärme im Abgas	%	1.62
Verluste durch Rostdurchfall	%	0.0
mittl. Gesamt-Wirkungsgrad bez. Hu	%	86.3

Feuerungstechnische Daten

Abgastemp gemittelt	°C	119.9
Luftzahl	-	2.575
mittlerer CO2-Wert	Vol%	7.77

Anlage Nr. 22, Fortsetzung

SMPS-Messung vor Gewebefilter, TPE vor Gewebefilter, Gasanalyse nach Gewebefilter

Feinpartikel

	Einheit	Testrun 1	Testrun 2	Testrun 3	Mittelwert	Stand.-Abw.
PTNC-Emissionen gemittelt 13% O ₂	#/cm ³	2.92E+07	3.67E+07	2.60E+07	3.07E+07	5479385.31
PTNC-Emissionen normiert Atm	#/m ³	3.51E+13	3.17E+13	2.71E+13	3.13E+13	4.0133E+12
PTNC-Emissionen 13%normiert	#/m ³	2.81E+13	3.53E+13	2.51E+13	2.95E+13	5.2738E+12
PTNC-Emissionsfaktor Brst trocken	#/kg	3.26E+20	4.12E+20	2.92E+20	3.43E+20	6.1714E+19
PTNC-Emissionsfaktor bez. Hu	#/MJ	1.89E+13	2.38E+13	1.69E+13	1.99E+13	3.5714E+12
Partikel Mode	nm	153.2	123.5	127.4	134.68	16.1370691
Partikel PM gemittelt 13% O ₂	kg/m ³	1.9E-04	7.5E-05	1.1E-04	0.00	5.8196E-05
PM-Emissionen normiert Atm	mg/mn ³	226	65	112	134.43	82.9063768
PM-Emissionen 13%normiert	mg/mn ³	181	72	104	119.13	56.0125452
PM-Emissionsfaktor Brst trocken	g/kg	2.101	0.842	1.210	1.38	0.64739798
PM-Emissionsfaktor bez. Hu	mg/MJ	122	49	70	80.10	37.4651609

Gesamtstaub (TPE)

	Einheit	Test run 1	Test run 2	Test run 3	Test run 4	Test run 5	Test run 6	Mittelwert	Stand.-Abw.
TPE-Emissionen gemittelt	mg/mn ³	579.20	264.68	390.96	1547.77	1296.23	211.70	715.09	567.61
TPE-Emissionen 13%normiert	mg/mn³	462.62	294.99	364.77	924.88	774.57	126.50	491.39	302.22
TPE-Emissionsfaktor Brst trocken	g/kg	5.36	3.44	4.25	11.75	9.84	1.61	6.04	3.93
TPE-Emissionsfaktor bez. Hu	mg/MJ	310.22	198.85	245.70	680.26	569.70	93.04	349.63	227.45

Anlage Nr. 22, Fortsetzung

SMPS-Messung nach Gewebefilter, TPE nach Gewebefilter, Gasanalyse nach Gewebefilter

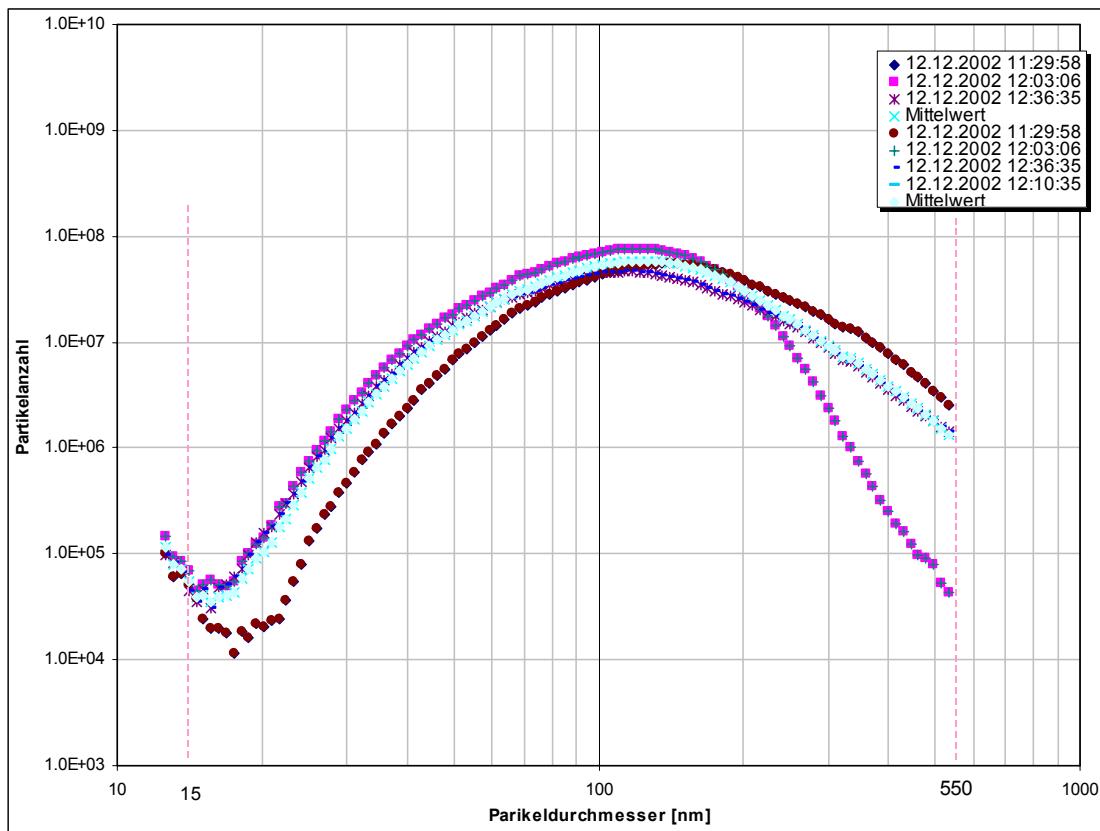
Gesamtpartikelanzahl (SMPS)	Einheit	Testrun 1	Testrun 2	Testrun 3	Mittelwert	Stand.-Abw.
PTNC-Emissionen gemittelt 13% O ₂	#/cm ³	6.05E+02	5.87E+02	1.22E+03	8.03E+02	3.59E+02
PTNC-Emissionen normiert Atm	#/m ³	7.37E+08	7.13E+08	8.06E+08	7.52E+08	4.84E+07
PTNC-Emissionen 13%normiert	#/m ³	5.78E+08	5.61E+08	1.16E+09	7.68E+08	3.43E+08
PTNC-Emissionsfaktor Brst trocken	#/kg	6.62E+15	6.47E+15	1.36E+16	8.88E+15	4.05E+15
PTNC-Emissionsfaktor bez. Hu	#/MJ	3.83E+08	3.74E+08	7.84E+08	5.14E+08	2.34E+08
Partikel Mode	nm	332.2	369.6	395.5	365.77	31.82
Partikel PM gemittelt 13% O ₂	kg/m ³	1.4E-08	1.3E-08	2.9E-08	0.000	0.000
PM-Emissionen normiert Atm	mg/mn ³	0.017	0.016	0.020	0.018	0.002
PM-Emissionen 13%normiert	mg/mn ³	0.014	0.013	0.028	0.018	0.009
PM-Emissionsfaktor Brst trocken	g/kg	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
PM-Emissionsfaktor bez. Hu	mg/MJ	0.009	0.008	0.019	0.012	0.006

Gesamtstaub (TPE)

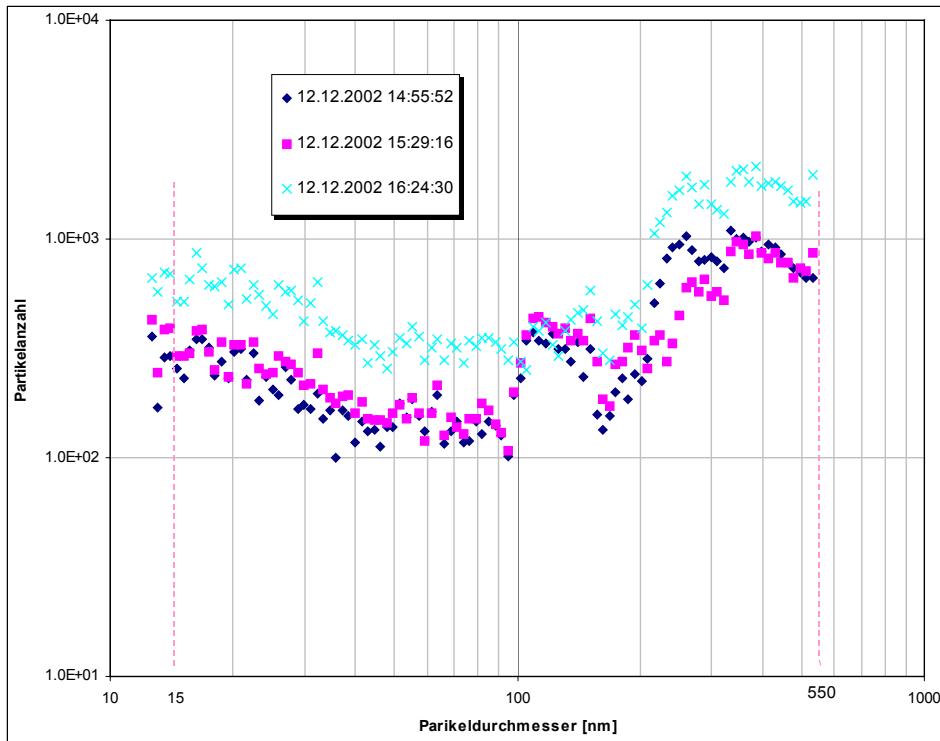
	Einheit	Test run 1	Test run 2	Mittelwert	Stand.-Abw.
TPE-Emissionen gemittelt	mg/mn ³	2.50	11.01	6.76	4.25
TPE-Emissionen 13%normiert	mg/mn ³	2.32	9.46	5.89	3.57
TPE-Emissionsfaktor Brst trocken	g/kg	0.03	0.11	0.07	0.04
TPE-Emissionsfaktor bez. Hu	mg/MJ	1.55	6.30	3.93	2.37

Anlage Nr. 22, *Fortsetzung*

SMPS-Messung vor Gewebefilter, Mittelwerte von jeweils 10 Scans



SMPS-Messung nach Gewebefilter, Mittelwerte aus jeweils 10 Scans



Anlage Nr. 22, Fortsetzung

Betriebskosten

Investitionskosten inkl. Planungskosten		Kapitalkosten Zinssatz 5%		
Filtersystem mit Kalkzugabe	CHF 180'000.-	Nutzungsdauer 20 Jahre	CHF 14'436.-	
Raumbedarf \geq CHF 400.-/m ³ $m^3 = 0.04 \times \text{Kesselleistung}$	CHF 9'600.-	Nutzungsdauer 40 Jahre	CHF 560.-	
		Wartungskosten 3 Manntage	CHF 1'200.-	
		Unterhaltskosten	CHF 500.-	
		Hilfsenergiekosten und Kalk 2'000 Nennleistungsstunde 4'000 Nennleistungsstunde	CHF 2'800.- CHF 4'900.-	
spezifischen Filterkosten in CHF/MWh _{produzierter Wärme} bei				
2'000 Nennleistungsstunden Anteil Kapitalkosten/Betriebskosten 77/23%			CHF 16.2/MWh	
4'000 Nennleistungsstunden Anteil Kapitalkosten/Betriebskosten 69/31%			CHF 9.0 /MWh	

Bezugswert: Kesselleistung 600 kW

Wartungsaufwand: Reinigung, Störungsbehebung und Kontrolle

Unterhaltsaufwand: Nach 12 Betriebsjahren noch kein Ersatz der Filtereinsätze, kein Service

Einschalttemperatur Filtersystem: 130°C

Anlage Nr. 23

Gasanalyse nach Gewebefilter, allgemeine feuerungstechnische Daten für gesamte Messdauer

Versuchsbeschreibung

Projektname	FMK III
Messobjekt	Schnitzel-Kessel, Vorschub-Rost
Anlagenbeschreibung	Fernwärme, Netzgeregelt, 2500 kW
Leistung am Messtag	Variabel, über 80% der Maximalleistung

Versuchsbezeichnung

Datum	18.12.2003
Messbeginn	12:14:00
Messende	17:55:00
Messdauer	05:41:00
Messomatfilename	A021218

Versuchsumgebung

Umgebunstemperatur	°C	0
Umgebungsdruck	hPa	907
Rel. Luftfeuchtigkeit	%	80

Emissionen**Kohlenmonoxid**

Kohlenmonoxid gemittelt	ppmv	6
CO-Emissionen 13%normiert	mg/mn3	10
CO-Emissionsfaktor Brst trocken	g/kg	0.123
CO Emissionsfaktor bez. Hu	mg/MJ	7

Stickoxide

NOx-Emissionen gemittelt	ppmv	78
NOx-Emissionen 13%normiert	mg/mn3	215
NOx-Emissionsfaktor Brst trocken	g/kg	2.639
NOx-Emissionsfaktor bez. Hu	mg/MJ	152

Energiebilanz

Verluste d. abgeführte Wärme im Abgas	%	12.5
Verluste d. geb. Wärme im Abgas	%	0.00
Verluste durch Rostdurchfall	%	0.1
mittl. Gesamt-Wirkungsgrad bez. Hu	%	87.4

Feuerungstechnische Daten

Abgastemp gemittelt	°C	144.3
Luftzahl	-	3.527
mittlerer CO2-Wert	Vol%	5.75

Anlage Nr. 23, Fortsetzung

SMPS-Messung vor Gewebefilter, TPE vor Gewebefilter, Gasanalyse nach Gewebefilter

Feinpartikel

	Einheit	Testrun 1	Testrun 2	Testrun 3	Mittelwert	Stand.-Abw.
Gesamtpartikelanzahl (SMPS)						
PTNC-Emissionen gemittelt 13% O ₂	#/cm ³	9.68E+07	8.57E+07	6.63E+07	8.29E+07	1.54E+07
PTNC-Emissionen normiert Atm	#/mn ³	1.15E+14	1.03E+14	9.25E+13	1.03E+14	1.10E+13
PTNC-Emissionen 13%normiert	#/mn ³	8.67E+13	7.68E+13	5.94E+13	7.43E+13	1.38E+13
PTNC-Emissionsfaktor Brst trocken	#/kg	1.06E+21	9.41E+20	7.28E+20	9.10E+20	1.69E+20
PTNC-Emissionsfaktor bez. Hu	#/MJ	6.13E+13	5.43E+13	4.20E+13	5.25E+13	9.76E+12
Partikel Mode	nm	89.0	87.7	99.2	91.99	6.30
Partikel PM gemittelt 13% O ₂	kg/m ³	7.3E-05	6.2E-05	7.2E-05	6.90E-05	5.65E-06
PM-Emissionen normiert Atm	mg/mn ³	86	75	100	87.09	12.64
PM-Emissionen 13%normiert	mg/mn ³	65	56	64	61.77	5.06
PM-Emissionsfaktor Brst trocken	g/kg	0.797	0.685	0.789	0.76	0.06
PM-Emissionsfaktor bez. Hu	mg/MJ	46	40	46	43.69	3.58
Gesamtstaub (TPE)						
	Einheit	Test run 1	Test run 2	Test run 3	Mittelwert	Stand.-Abw.
TPE-Emissionen gemittelt	mg/mn ³	148.00	182.46	180.49	170.32	19.35
TPE-Emissionen 13%normiert	mg/mn³	111.85	136.19	116.42	121.48	12.94
TPE-Emissionsfaktor Brst trocken	g/kg	1.37	1.67	1.43	1.49	0.16
TPE-Emissionsfaktor bez. Hu	mg/MJ	79.10	96.32	82.34	85.92	9.15

Anlage Nr. 23, Fortsetzung

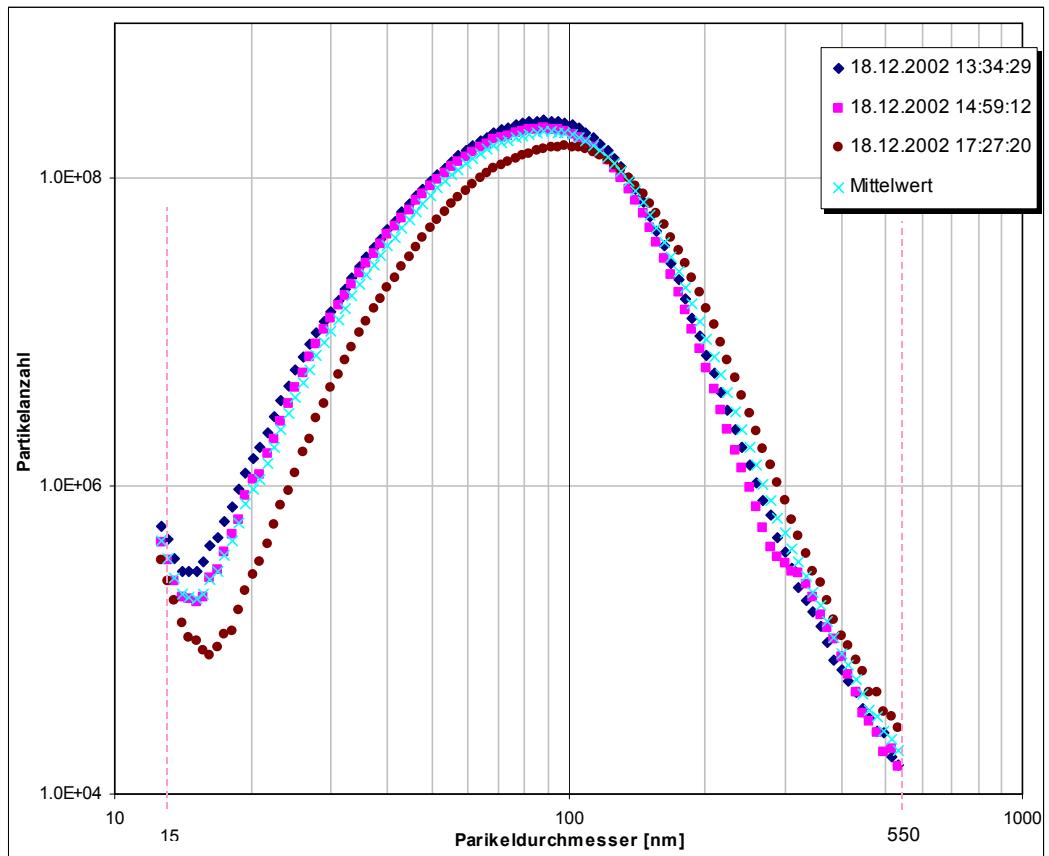
SMPS-Messung nach Gewebefilter, TPE nach Gewebefilter, Gasanalyse nach Gewebefilter

Feinpartikel

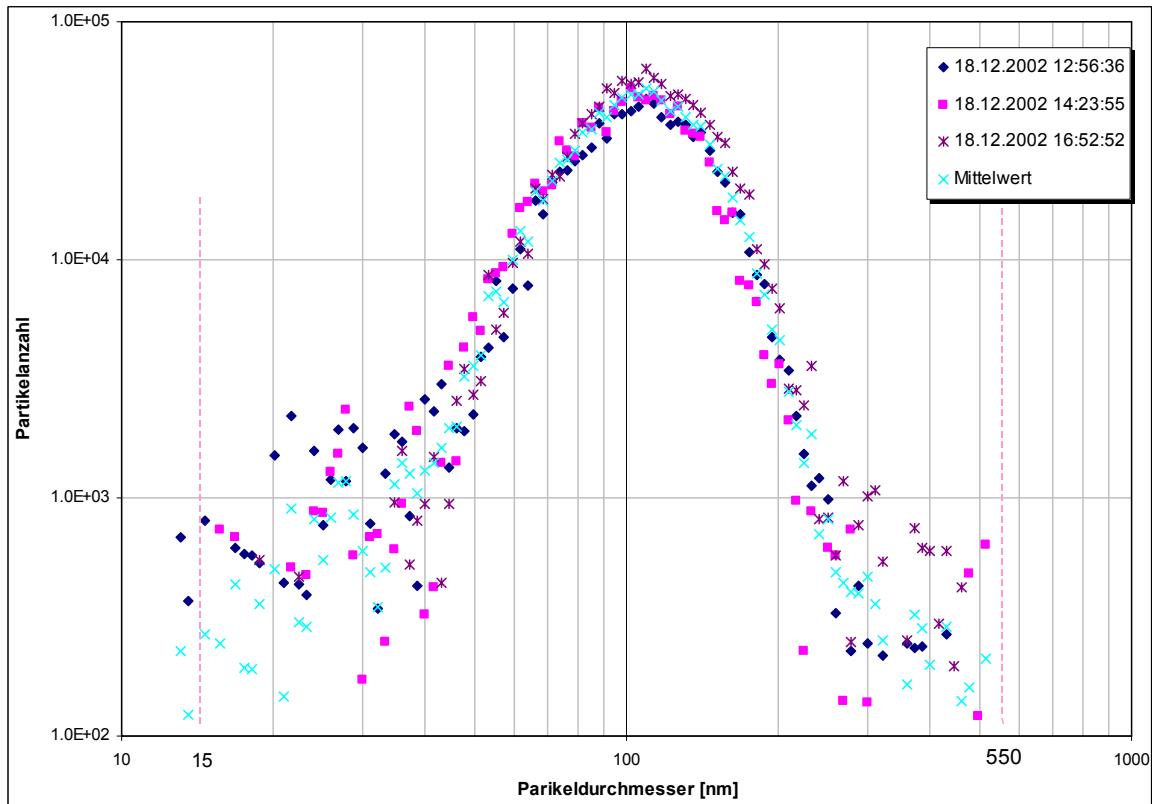
	Einheit	Testrun 1	Testrun 2	Testrun 3	Mittelwert	Stand.-Abw.
Gesamtpartikelanzahl (SMPS)						
PTNC-Emissionen gemittelt 13% O ₂	#/cm ³	1.53E+04	1.63E+04	1.93E+04	1.70E+04	2.11E+03
PTNC-Emissionen normiert Atm	#/mn ³	1.89E+10	1.81E+10	2.17E+10	1.96E+10	1.90E+09
PTNC-Emissionen 13%normiert	#/mn ³	1.37E+10	1.46E+10	1.73E+10	1.52E+10	1.89E+09
PTNC-Emissionsfaktor Brst trocken	#/kg	1.68E+17	1.78E+17	2.12E+17	1.86E+17	2.32E+16
PTNC-Emissionsfaktor bez. Hu	#/MJ	9.67E+09	1.03E+10	1.22E+10	1.07E+10	1.34E+09
Partikel Mode	nm	107.6	108.1	113.4	109.7	3.2
Partikel PM gemittelt 13% O ₂	kg/m ³	2.14E-08	2.1E-08	3.2E-08	2.47E-08	6.29E-09
PM-Emissionen normiert Atm	mg/mn ³	0.027	0.023	0.036	0.028	0.007
PM-Emissionen 13%normiert	mg/mn ³	0.019	0.019	0.029	0.022	0.006
PM-Emissionsfaktor Brst trocken	g/kg	0.0002	0.0002	0.0004	0.0003	0.0001
PM-Emissionsfaktor bez. Hu	mg/MJ	0.014	0.013	0.020	0.016	0.004
Gesamtstaub (TPE)						
	Einheit	Testrun 1	Testrun 2	Testrun 3	Mittelwert	Stand.-Abw.
TPE-Emissionen gemittelt	mg/mn ³	1.46	2.68	7.10	3.75	2.96E+00
TPE-Emissionen 13%normiert	mg/mn ³	1.06	2.16	5.66	2.96	2.40E+00
TPE-Emissionsfaktor Brst trocken	g/kg	0.01	0.03	0.07	0.04	2.94E-02
TPE-Emissionsfaktor bez. Hu	mg/MJ	0.75	1.53	4.00	2.10	1.70E+00

Anlage Nr. 23, *Fortsetzung*

SMPS-Messung vor Gewebefilter, Mittelwerte von jeweils 10 Scans



SMPS-Messung nach Gewebefilter, Mittelwerte von jeweils 10 Scans



Anlage Nr. 23, Fortsetzung

Betriebskosten

Investitionskosten inkl. Planungskosten		Kapitalkosten Zinssatz 5%	
Filtersystem	CHF 322'000.-	Nutzungsdauer 20 Jahre	CHF 25'824.-
Raumbedarf \geq CHF 300.-/m ³ m ³ = 0.04 x Kesselleistung	CHF 38'400.-	Nutzungsdauer 40 Jahre	CHF 2'239.-
		Wartungskosten 3 Manntage	CHF 1'200.-
		Unterhaltskosten	CHF 4'700.-
		Hilfsenergiekosten 2'000 Nennleistungsstunde 4'000 Nennleistungsstunde	CHF 16'200.- CHF 27'600.-
spezifischen Filterkosten in CHF/MWh _{produzierter Wärme} bei			
2'000 Nennleistungsstunden Anteil Kapitalkosten/Betriebskosten 56/44%			CHF 7.8/MWh
4'000 Nennleistungsstunden Anteil Kapitalkosten/Betriebskosten 46/54%			CHF 4.8/MWh

Bezugswert: Kesselleistung 3200 kW

Wartungsaufwand: Reinigung, Störungsbehebung und Kontrolle

Unterhaltsaufwand: Ersatz Filtereinsätze, Service

Einschalttemperatur Filtersystem: 140°C

Maximaltemperatur Filtersystem: 225°C