

# Feinstaubabscheidung für automatische Feuerungen

Technik und Wirtschaftlichkeit von Elektroabscheidern und Gewebefiltern für Holzfeuerungen von 100 kW bis 2 MW

Von PD Dr. Thomas Nussbaumer\*, Zürich

**Als Diskussionsbasis zur Festlegung künftiger Grenzwerte wird im folgenden Beitrag aufgezeigt, welche Kosten die Feinstaubabscheidung bei Anlagen von 100 kW bis 2 MW verursachen. Im Weiteren werden der Stand der Technik beurteilt und flankierende Maßnahmen bei einer Praxiseinführung aufgezeigt. Dabei wird auch für Holzfeuerungsanlagen unter 1 MW ein Grenzwert von 20 mg/m<sup>3</sup> vorausgesetzt, da dies beim Einsatz eines Feinstaubabscheiders als sicher erreichbar beurteilt wird. Der Beitrag basiert auf einem ausführlichen Bericht, in welchem die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen für schweizerische Verhältnisse dargestellt sind [1].**

Die Verwertung von Holz ist bei nachhaltiger Waldbewirtschaftung CO<sub>2</sub>-neutral, weshalb eine vermehrte Nutzung zum Ersatz fossiler Ressourcen anzustreben ist. Holzfeuerungen verursachen allerdings vergleichsweise hohe Staubemissionen. Feinstaub kleiner 10 µm (Particulate Matter PM 10) ist lungengängig und gesundheitsschädlich. Da die Immissionsgrenzwerte an Feinstaub überschritten werden, besteht erheblicher Handlungsbedarf zur Reduktion der Emissionen. Die Hauptquellen von Feinstaub aus Verbrennungsprozessen sind Dieselmotoren und Holzfeuerungen, welche in der Schweiz vergleichbar hohe Feinstaubfrachten verursachen [2].

Staub aus Verbrennungsprozessen ist potenzieller Träger von kanzerogenen Stoffen und deshalb besonders kritisch. Dennoch gibt es auch bei Verbrennungsstäuben große Unterschiede. So ist Feinstaub aus gut betriebenen automatischen Holzfeuerungen vorwiegend anorganisch und deshalb weniger toxisch als Dieselruss [3]. Dieselruss wiederum ist weniger toxisch als Feinstaub aus schlecht betriebenen handbeschickten Feuerungen, welcher hohe Konzentrationen an polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) enthalten kann [4].

Aus Sicht der Gesundheitsgefährdung sind deshalb Maßnahmen bei Holzöfen und Cheminees besonders wirksam. Ausreichende Maßnahmen dazu sind aber noch nicht absehbar. Aus diesem Grund ist anzustreben, dass eine vermehrte Nutzung von Energieholz vorwiegend in automatischen Holzfeuerungen mit Feinstaubabscheidung oder in Großanlagen zur Stromerzeugung erfolgt.

Eine vermehrte Energieholznutzung in automatischen Feuerungen ohne Feinstaubminderung führt dagegen zu einer erhöhten Feinstaubbelastung, da automatische Holzfeuerungen Staubemissionen zwischen 50 mg/m<sup>3</sup> und bis

zu über 150 mg/m<sup>3</sup> aufweisen. Für Holzbrennstoffe gelten in Deutschland gemäß TA Luft:

- ◆ ab 5 MW ein Emissionsgrenzwert von 20 mg/m<sup>3</sup>,
- ◆ zwischen 2,5 MW und 5 MW von 50 mg/m<sup>3</sup> und
- ◆ zwischen 1 MW und 2,5 MW von 100 mg/m<sup>3</sup> und
- ◆ unter 1 MW gemäß BImSchV von 150 mg/m<sup>3</sup>.

Im Text gelten dabei alle Emissionswerte ab 1 MW bei 11 Vol.-% O<sub>2</sub> (gemäß TA Luft) und bis 1 MW gemäß bei 13 Vol.-% O<sub>2</sub> (gemäß 1. BImSchV). Für Anlagen bis 1 MW gilt in der Schweiz der gleiche Wert, während derzeit noch für Anlagen von 1 MW bis 5 MW ein Grenzwert von 150 mg/m<sup>3</sup> gilt.

In der Schweiz ist als Teil des Maßnahmenplans zur Feinstaubreduktion für Anlagen von 1 MW bis 5 MW ab Mitte 2007 eine Verschärfung des Grenzwerts auf 20 mg/m<sup>3</sup> und ab 5 MW auf 10 mg/m<sup>3</sup> geplant, womit der Einsatz von Feinstaubabscheidern verlangt werden soll.

Für Anlagen unter 1 MW ist die zeitlich verzögerte Einführung eines Grenzwerts vorgesehen, wobei die untere Leistungsgrenze noch nicht definitiv festgelegt ist und derzeit 30 mg/m<sup>3</sup> als Grenzwert vorgeschlagen sind.

## Feinstaub aus Holzfeuerungen

Bei der Verbrennung von Holz können folgende Arten von Feinstaub emittiert werden:

### Brennbare Partikel:

- ◆ organische Verbindungen aus der Zersetzung des Holzes
- ◆ Ruß und durch Synthese gebildete organische Verbindungen
- ◆ Holzbestandteile

### Unbrennbare Partikel

- ◆ Anorganische Feinststäube, insbesondere Salze

- ◆ Anorganische Grobpartikel durch Mitreißen von Rostasche
- ◆ Schwermetalle aus kontaminiertem Holz.

Ruß und organische Verbindungen sind die Folge einer unvollständigen Verbrennung. Anorganische Partikel entstehen durch Verdampfung von anorganischen Brennstoffkomponenten wie Kalium und Calcium, welche bei der Abkühlung im Abgas zu salzartigen Partikeln führen.

Während organische Partikel vor allem bei handbeschickten Holzfeuerungen in hohen Konzentration auftreten können, machen bei automatischen Holzfeuerungen die anorganischen Verbindungen meist mehr als 95 Gew.-% der Staubemissionen aus. Diese Partikel sind zum überwiegenden Teil kleiner als 1 µm mit einem Maximum der Partikelanzahl bei knapp unter 0,1 µm.

Sofern ein verstärktes Mitreißen aus dem Glutbett auftritt, werden zusätzlich Partikel mit Korngrößen über 1 µm emittiert. Diese grobe Flugasche kann teilweise in einem Multizyklon abgeschieden werden, während Feinstaub unter 1 µm durch Trägheitstauger praktisch nicht abgeschieden werden. Das Mitreißen von Partikeln aus dem Glutbett kann auch einen Austrag von Funken verursachen, welche in Gewebefiltern zu einer Zerstörung der Filterschläuche führen können.

Daneben können auch anorganische Partikel über 1 µm emittiert werden. Dieser Anteil ist vor allem bei der Verbrennung von Rinde erhöht. Die Emission an Russ kann dagegen weitgehend vermieden werden. Sofern sie auftritt, führt sie zu zusätzlichen Partikeln grösser 0,1 µm. Da solche kohlenstoffhaltige Partikel brennbar sind, können sie bei Ablagerung in Abscheidern zu Bränden führen. In Elektroabscheidern werden sie zudem nur bedingt abgeschieden. Für Elektroabscheider wird deshalb ein maximaler Wert an Unverbranntem von meist 10 Gew.-% verlangt, während bei Gewebefiltern lediglich 2 Gew.-% zulässig sind. In Gewebefiltern können aber auch gasförmige organische Verbindungen Schäden durch Verklebungen verursachen.

## Verfahren zur Staubabscheidung

Die Verfahren zur Staubabscheidung beruhen auf folgenden Mechanismen (vgl. 5 bis 7 und Abbildung 1):

- ◆ Fliehkraftabscheidung (Zyklon, Multizyklon)
- ◆ Elektrische Feldkräfte (Trocken- und Nass-Elektroabscheider)
- ◆ Filtration durch Gitterwirkung und Haftkräfte (Gewebe-, Metall-, Schütttschicht- und Keramikfilter)
- ◆ Nassentstaubung, Nasswäscher (Grenzflächenkräfte).

Elektroabscheider werden auch als Elektrofilter bezeichnet. Da die Abscheidung jedoch nicht durch Filtration

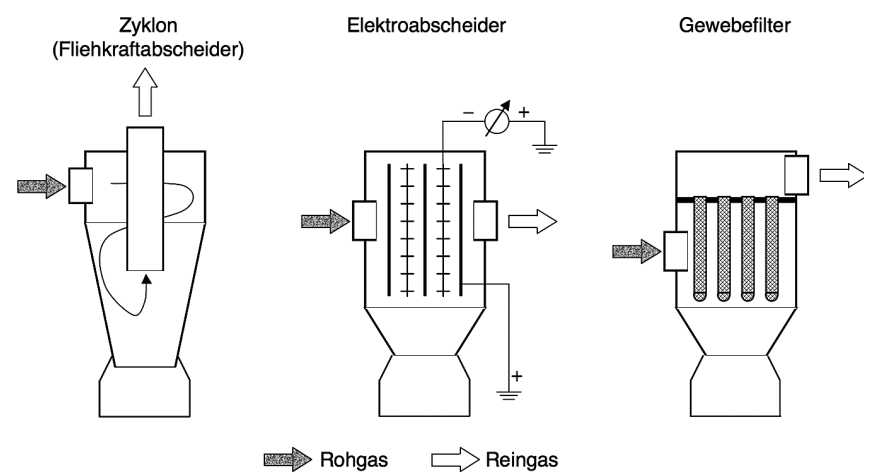


Abbildung 1 Funktionsprinzip von Zyklon, Elektroabscheider und Gewebefilter

erfolgt, wird im Beitrag der Begriff Elektroabscheider verwendet.

Für automatische Holzfeuerungen kommen hauptsächlich Elektroabscheider und Gewebefilter zum Einsatz. Multizyklone erzielen nur für Partikel über 5 µm eine Abscheidewirkung von über 50 % und ermöglichen bei automatischen Holzfeuerungen in der Regel die Einhaltung des heutigen Grenzwerts von 150 mg/m<sup>3</sup>. Daneben werden Multizyklone oft als Vorabscheider zur Verringerung der Staubfracht und bei Gewebefiltern zum Schutz vor Funken eingesetzt. Bei Elektroabscheidern werden Zykclone eingesetzt, wenn unverbrannte Grobpartikel größer 5 µm im Abgas enthalten sind, da diese im Elektroabscheider nur unzureichend abgeschieden werden.

Nasswäscher und Anlagen zur Abgaskondensation weisen für Partikel aus Holzfeuerungen nur beschränkte Abscheidegrade auf und kommen zur Staubabscheidung meist nur in Kombination mit einem nachgeschalteten Nass-Elektroabscheider zum Einsatz.



Abbildung 2 Elektroabscheider für Leistungen unter 1 MW

Grafik: Aerob-Beth

elektroabscheider angeboten, bei denen die Abreinigung durch mechanische Bürsten erfolgt. Eine Sonderbauform bilden Nass-Elektroabscheider, bei welchen die Abreinigung durch einen Flüssigkeitsfilm erfolgt.

Bei Trocken-Elektroabscheidern ist eine Taupunktunterschreitung unerwünscht, da sie zu einem Kurzschluss führen kann. Zur Verhinderung von Störungen wird bei Platten-Elektroabscheidern meist eine elektrische Beheizung der aus dem Gasstrom zurückvernetzten Isolatoren eingesetzt. Um die Ablagerung klebriger Stäube zu verhindern, besteht zudem die Möglichkeit, die Hochspannung bei Unterschreitung des Taupunkts auszuschalten.

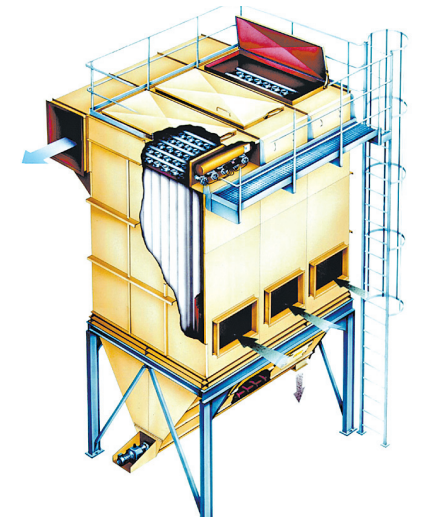


Abbildung 3 Gewebefilter

Grafik: Scheuch

## Gewebefilter

Bei Gewebefiltern erfolgt die Abscheidung über eine einzige Filtrationsstufe, über welche in der Regel ein Abscheidegrad von über 99 % erzielt wird. Die Durchströmung der Filtrationsstufe führt zu einem großen Druckverlust, weshalb der Einsatz eines Gewebefilters eine erhöhte Ventilatorleistung mit entsprechendem Energieverbrauch erfordert. Die Staubschicht muss periodisch abgereinigt werden, was mit Druckluft erfolgt und einen zusätzlichen Energieverbrauch verursacht.

Die Problematik der Taupunktunterschreitung ist bei Gewebefiltern besonders kritisch, da bereits eine einmalige Unterschreitung durch Aufbau einer klebrigen Schicht zu einer Zerstörung des Filtermaterials führen und hohe Kosten verursachen kann. Zur Vermeidung von Taupunktunterschreitungen werden Gewebefilter für Holzfeuerungen deshalb oft mit einem geregelten Bypass ausgerüstet. Die Freigabetemperatur wird zum Beispiel bei einem Brennstoffwassergehalt von 10 % auf 120°C festgelegt oder bei 50 % Wassergehalt auf 140°C erhöht. Der Bypassbetrieb kann die Gesamtemissionen in der Praxis deshalb entsprechend erhöhen.

Obwohl auch Gewebefilter für Brennstoffwassergehalte von bis zu 50 % angeboten werden, wird für Gewebefilter dennoch grundsätzlich der Einsatz von trockenen Brennstoffen empfohlen. Zudem ist besonders auf ei-

## Elektroabscheider

Elektroabscheider erzielen sehr hohe Abscheidegrade für Partikel über 1 µm sowie für solche kleiner 0,1 µm, während der Abscheidegrad für Korngrößen zwischen rund 0,2 und 0,8 µm ein Minimum aufweist.

Der Gesamtabseidegrad ist abhängig von der Spannung und der Gasverweilzeit im Abscheider respektive der spezifischen Abscheidefläche. Bei gegebenem Gasvolumenstrom kann die Abscheidung somit durch Vergrößerung der Abscheidefläche erhöht werden. Für Feinstaub aus Holzfeuerungen werden typische Abscheidegrade in der Größenordnung von 95 % erzielt, während für weit über 99 % Abscheidung sehr große Abscheideflächen erforderlich wären. Elektroabscheider weisen nur geringe Druckverluste auf, so dass in der Regel der konventionelle Abgasventilator ausreicht. Sie sind zudem unempfindlich gegenüber Funken.

Elektroabscheider werden in Platten- oder Röhrenbauweise ausgeführt. Für automatische Holzfeuerungen sind Platten-Elektroabscheider als etablierte Technik verfügbar, welche mit Klopf-richtungen periodisch abgereinigt werden. Als Alternative werden Rohr-

## ZUSAMMENFASSUNG

Da die Immissionsgrenzwerte an gesundheitsschädlichem Feinstaub seit Jahren überschritten werden und die Holzfeuerungen überproportional dazu beitragen, sind Maßnahmen zur Feinstaubminderung aus Holzfeuerungen gefordert.

In den nächsten Jahren ist mit verschärften Grenzwerten zu rechnen, welche den Einsatz von Feinstaubabscheidern bereits für Leistungen unter 1 MW erforderlich machen. In der Schweiz ist dies ab Mitte 2007 vorerst für Anlagen ab 1 MW und zeitlich verzögert auch für kleinere Anlagen geplant, wobei die untere Leistungsgrenze noch nicht definitiv feststeht.

Zur Feinstaubabscheidung für Anlagen zwischen 100 kW und 2 MW kommen sowohl Elektroabscheider als auch Gewebefilter in Frage. Beide

Verfahren sind als Stand der Technik verfügbar und es existieren weitgehend positive Betriebserfahrungen von einzelnen Referenzanlagen unter 500 kW.

Bei einem Kapitalzins von 5 % pro Jahr und einem Brennstoffpreis von 3 Cent/kWh für Energieholz verteuert der Einsatz von heute in Referenzanlagen eingesetzten Feinstaubabscheidern die Wärme aus Holz im Fall eines Neubaus in etwa wie folgt:

- ◆ Für 2 MW Leistung wird die Wärme um rund 5 % bis 6 % verteuert,
- ◆ für 1 MW um 7 % bis 8 %,
- ◆ für 500 kW um 9 % bis 12 %,
- ◆ für 200 kW um 17 % bis 21 % und
- ◆ für 100 kW um 28 % bis 30 %.

Die tieferen Werte gelten für Gewebefilter, welche geringfügig niedrigere Gesamtkosten als Elektroabscheider verursachen, aber auch höhere

Anforderungen an Brennstoff und Feuerung stellen. Je nach Anwendung und Finanzierungsart kommen deshalb beide Verfahren in Frage, wobei vor allem für feuchte Brennstoffe oder häufigen Ein-/Aus-Betrieb Elektroabscheider bevorzugt werden. Bei einer breiten Markteinführung ist noch mit einem Potenzial zur Kostenreduktion zu rechnen, vor allem bei den Investitionskosten für Elektroabscheider sowie durch einen möglichen Einsatz von Metallgewebefiltern. Obwohl Feinstaubabscheider im Grundsatz eine effiziente Staubabscheidung als Sekundärmaßnahme erzielen, kann ihr Einsatz bei Holzfeuerungen die Anforderungen an die Feuerungs- und Regeltechnik erhöhen, weshalb auch eine weitere Optimierung der gesamten Anlagentechnik erforderlich ist.

## Feinstaubabscheidung für automatische Feuerungen

Fortsetzung von Seite 000

nen möglichst stationären Betrieb der Feuerungsanlage mit langen Laufzeiten und wenig Anfahrzyklen zu achten.

In Gewebefiltern können auch gasförmige Schadstoffe wie SO<sub>2</sub> und HCl sowie polychlorierte Dibenzo-p-Dioxine und Furane (PCDD/F) abgeschieden werden. Für saure Verbindungen wie HCl wird bereits durch die basische Holzrasche eine gewisse Abscheidung erzielt, während für eine effiziente Abscheidung Kalk zugegeben werden kann. Eine Kalkzugabe wird teilweise auch zum Aufbau einer schützenden Schicht auf dem Filter vor Inbetriebnahme der Feuerung vorgenommen, was als Precoating bezeichnet wird. Zur Abscheidung von PCDD/F dient dagegen Herdofenkoks als Sorptionsmittel.

### Einsatz bei Holzfeuerungen

Bei einer breiten Einführung von Elektroabscheidern und Gewebefiltern bei automatischen Holzfeuerungen sind folgende Maßnahmen zu beachten:

- ◆ Da tiefe Temperaturen zur Freigabe der Feinstaubabscheider vor allem beim Anfahren und bei Teillastbetrieb auftreten, ist ein möglichst stationärer Betrieb der Feuerungsanlagen sicher zu stellen.

- ◆ Die Betriebsarten mit Bypass oder ausgeschalteter Hochspannung sind auf ein Minimum zu beschränken. Für die Genehmigung sollte eine Mindestverfügbarkeit für die Feinstaubabscheidung verlangt und deren Einhaltung kontrolliert werden.

- ◆ Im Weiteren sollten auch die Abreinigung der Feinstaubabscheider und allenfalls der Kessel für den Grenzwert berücksichtigt und während der Abnahmemessung erfasst werden.

Durch diese Maßnahmen werden die Anforderungen an die Planung und den Betrieb automatischer Holzfeuerungen erhöht und vor allem für kleinere Anlagen der Betriebsaufwand vergrößert. Erfahrungen von drei Anlagen zeigen jedoch, dass auch für Leistungen unter 1 MW ein zuverlässiger Betrieb mit vertretbarem Betriebsaufwand möglich ist. So waren im Kanton Thurgau während der letzten Heizperiode je eine Anlage mit 250 kW und 550 kW mit Elektroabscheider sowie eine 350 kW-Anlage mit Gewebefilter im Einsatz [1]. Die Abbildungen 2 und 3 zeigen den Aufbau der Abscheider, von welchen Betriebserfahrungen mit Anlagen unter 1 MW vorlie-

gen. Während der Abnahmemessungen wurden für alle drei Anlagen Staubemissionen von unter 5 mg/m<sup>3</sup> bei 13 Vol.-% O<sub>2</sub> ausgewiesen.

### Wirtschaftlichkeit

Um die Auswirkungen des Zusatzaufwands der Feinstaubabscheidung zu beurteilen, werden die Investitions- und Betriebskosten erfasst und anhand der Annuitätenmethode die Wärmegestehungskosten bestimmt. Die Berechnungen erfolgen für eine Anlagengröße von 100 kW, 200 kW, 500 kW, 1 MW und 2 MW Nutzwärmeleistung. Als Vergleichsszenario dient zudem die Wärmeerzeugung aus Heizöl. Für den Wirtschaftlichkeitsvergleich werden typische Energiepreise im Sommer 2006 und übliche Randbedingungen für die Finanzierung angenommen (vgl. Kasten S. ???). Die Wirtschaftlichkeitsabschätzung basiert damit auf etablierten Techniken und ist eher konservativ.

Für Elektroabscheider unter 500 kW besteht ein Kosteneinsparungspotenzial von bis zu gegen 50% durch die Markteinführung günstigerer Komponenten. Die Investitionskosten des Gewebefilters sind bereits auf tiefem Niveau, weshalb durch Einsatz wesentlich günstigerer Komponenten nur noch geringes Sparpotenzial besteht. Dagegen sind bei Gewebefiltern längere Lebensdauern und als Folge davon geringere Betriebskosten möglich. Die Potenziale zur Kosteneinsparung werden erst nach einer breiten Praxiseinführung beurteilt werden können.

### Investitionskosten mit und ohne Abscheider

Abbildung 4 zeigt die Investitionskosten einer automatischen Holzheizanlage unterteilt nach Technik (Heizanlage ohne Feinstaubabscheider), Gebäude (Heizraum und Silo) sowie Feinstaubabscheider. Elektroabscheider weisen deutlich höhere Investitionskosten auf als das Gewebefilter. So kostet zum Beispiel eine 1 MW-Anlage ohne Feinstaubabscheider inklusive Gebäude rund 645 000 Euro. Mit Gewebefilter betragen die Gesamtkosten rund 716 000 Euro, mit Elektroabscheider 762 000 Euro. Bei Kleinanlagen wirkt sich der Einsatz eines Feinstaubabscheiders stärker auf die Gesamtkosten aus als bei Grossanlagen. Abbildung 5 zeigt dazu die spezifischen Investitionskosten ei-

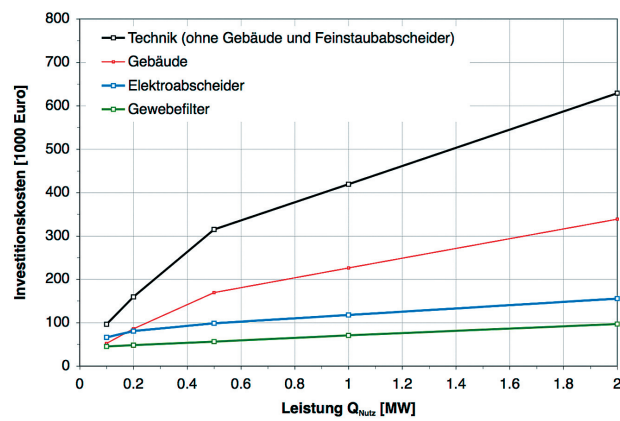


Abbildung 4 Investitionskosten Technik, Gebäude und Feinstaubabscheider für automatische Holzheizanlagen. Technik = Heizanlage ohne Silo und ohne Feinstaubabscheider, Gebäude = Heizraum und Silo.

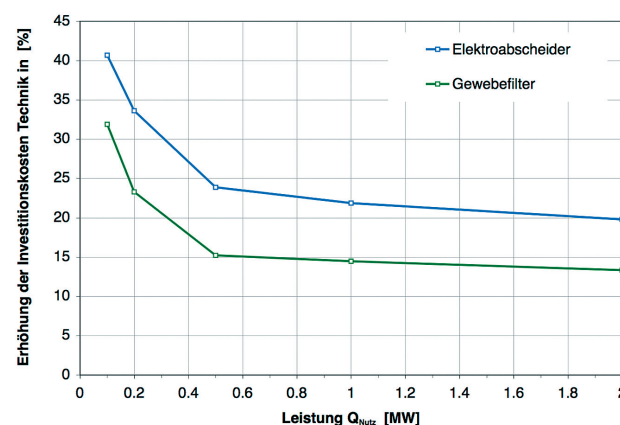


Abbildung 6 Prozentuale Erhöhung der Investitionskosten einer automatischen Holzheizanlage durch Einsatz eines Elektroabscheiders oder eines Gewebefilters in Prozent der Basiskosten für die Technik (Heizanlage exklusive Gebäude und Silo).

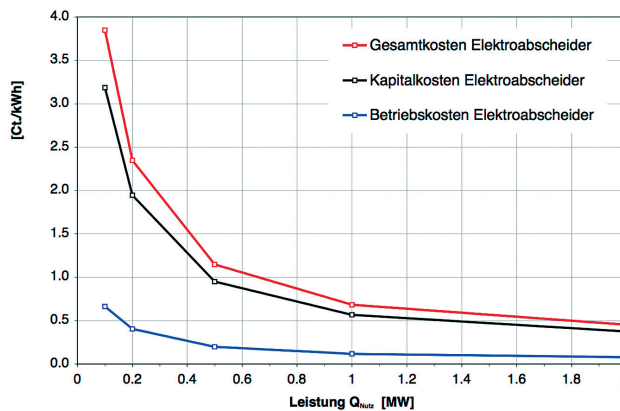


Abbildung 8 Erhöhung der Wärmegestehungskosten einer automatischen Holzheizung durch Einsatz eines Elektroabscheiders.

### Wärmegestehungskosten mit und ohne Abscheider

ner automatischen Holzheizanlage ohne und mit Feinstaubabscheider. Abbildung 6 zeigt die prozentuale Erhöhung der Investitionskosten durch Einsatz eines Feinstaubabscheiders. Die Technik (ohne Gebäude) einer 200 kW-Anlage wird durch ein Gewebefilter um 24 % und durch einen Elektroabscheider um 34 % verteuert. Eine 1 MW-Anlage wird durch ein Gewebefilter um 15 % und durch einen Elektroabscheider um 22 % verteuert.

### Wärmegestehungskosten mit und ohne Abscheider

Die Tabelle und Abbildung 7 zeigen die Wärmegestehungskosten für Holz und Heizöl, wobei für Holz die Fälle mit und ohne Feinstaubabscheider unterschieden sind. Die Kosten gelten inklusive Gebäude, jedoch ohne Wärmeverteilung für ein allfälliges Wärmenetz. Bei Brennstoffpreisen von 3 Ct./kWh für Holz kostet Wärme aus einer automatischen Holzheizung ohne Feinstaubabscheider für eine Leistung von 200 kW rund 11 Ct./kWh. Bei einem Heizölpreis von 6 Ct./kWh ist dies rund 10 % teurer als Wärme aus Heizöl. Ab 600 kW wird Holz kostengünstiger als Heizöl. Durch Einsatz eines Feinstaubabscheiders bei Holz erhöht sich die Leistung, ab welcher Holz billiger wird als Heizöl, auf rund 900 kW.

Die Abbildungen 8 und 9 zeigen die Erhöhung der Wärmegestehungskosten für Holz durch den Einsatz eines Feinstaubabscheiders unterteilt nach Kapital- und Betriebskosten. Der Elektroabscheider verursacht höhere Kapital- und geringere Betriebskosten als das Gewebefilter, welches insgesamt geringfügig tiefere

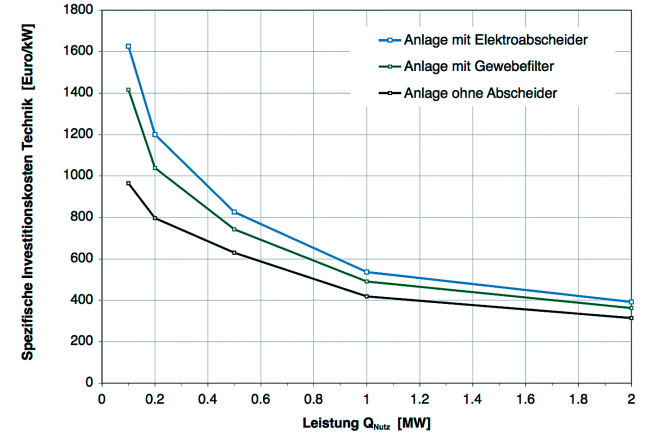


Abbildung 5 Spezifische Investitionskosten Technik (also exklusive Gebäude und Silo) einer automatischen Holzheizanlage ohne Feinstaubabscheider sowie mit Gewebefilter oder Elektroabscheider.

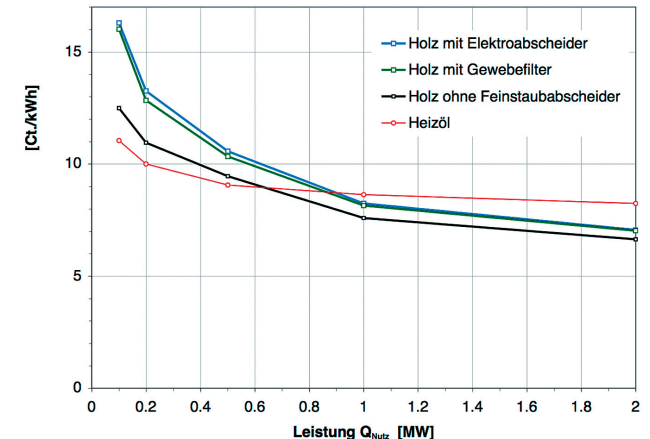


Abbildung 7 Wärmegestehungskosten für Heizöl sowie für Holz mit/ohne Feinstaubabscheider inklusive Gebäude und exklusive Wärmeverteilung für ein Wärmenetz für Brennstoffpreise von 3 Ct./kWh für Holz und 6 Ct./kWh für Heizöl sowie einen Kapitalzins von 5% p.a. entsprechend der Tabelle

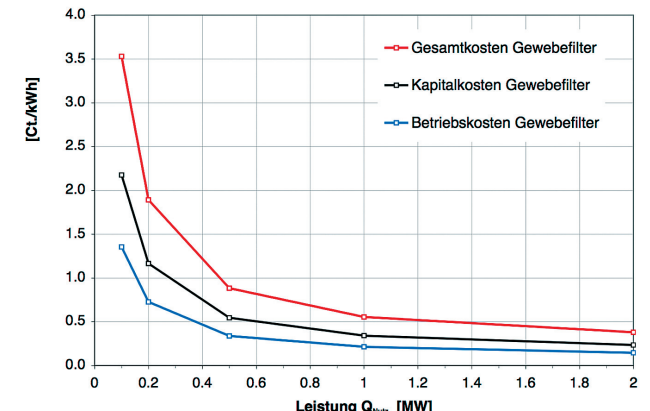


Abbildung 9 Erhöhung der Wärmegestehungskosten einer automatischen Holzheizung durch Einsatz eines Gewebefilters.

## Wärmegestehungskosten unterschiedlicher Systeme sowie prozentuale Verteuerung durch Feinstaubabscheider\*

Leistung	Heizöl		Holz		Holz mit Elektroabscheider		Holz mit Gewebefilter	
	Ct./kWh	Ct./kWh	Ct./kWh	%	Ct./kWh	%	Ct./kWh	%
100 kW	11,0	12,5	16,3	30	16,0	28		
200 kW	10,0	11,0	13,3	21	12,8	17		
500 kW	9,1	9,5	10,6	12	10,3	9		
1 MW	8,6	7,6	8,2	8	8,1	7		
2 MW	8,2	6,6	7,1	6	7,0	6		

\*Angaben gelten inklusive Gebäude und exklusive Wärmeverteilung für allfälliges Wärmenetz sowie für Brennstoffpreise von 3 Ct./kWh für Holz und 6 Ct./kWh für Heizöl und einen Kapitalzins von 5% p.a.

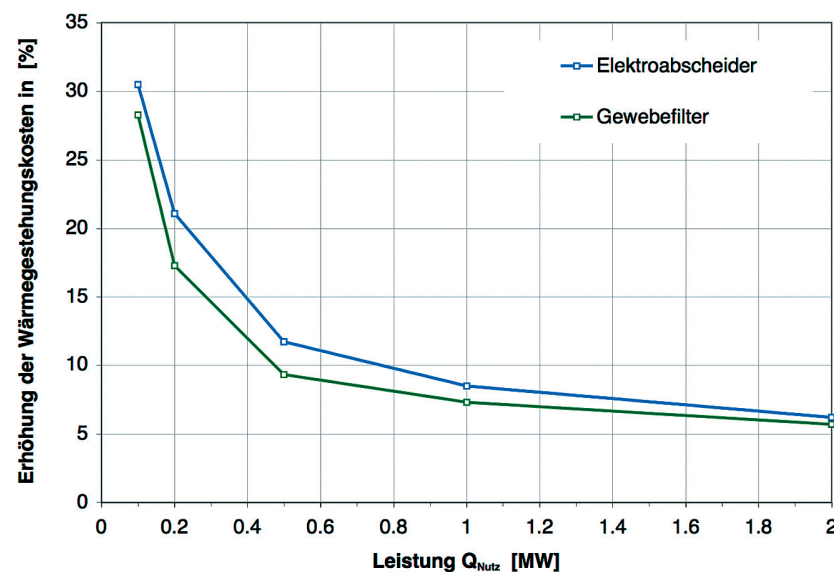


Abbildung 10 Prozentuale Erhöhung der Wärmegestehungskosten einer automatischen Holzheizung durch Einsatz eines Elektroabscheiders oder eines Gewebefilters entsprechend der Tabelle

Gesamtkosten verursacht. Wie Abbildungen 8 und 9 zeigen, verteuert ein Elektroabscheider die Wärme aus Holz für eine 200 kW-Heizanlage um rund 2,3 Ct./kWh. Wärme aus einer Anlage mit 500 kW wird durch einen Elektroabscheider um rund 1,1 Ct./kWh verteuert. Für 1 MW Leistung sinken die Zusatzkosten auf rund 0,6 Ct./kWh. Sofern die Anlage für den Einsatz eines Gewebefilters geeignet ist, verursacht das Gewebefilter im gesamten Leistungsbereich rund 15 % bis 20 % geringere Gesamtkosten als ein Elektroabscheider. Dabei ist allerdings nicht berücksichtigt, dass für das Gewebefilter höhere Anforderungen bezüglich Brennstoff und Betrieb einzuhalten sind.

Die ausgewiesene Differenz ist deshalb sowie aufgrund der Kostenschätzungen und des Einflusses der Finanzierungsart als gering zu bewerten, so dass beide Abscheidertypen je nach Anwendungsfall wirtschaftlich vorteilhaft sein können. In der Tabelle und in Abbildung 10 sind die Kostenerhöhungen durch die Feinstaubabscheidung in Prozent der Basiskosten angegeben.

### Schlussfolgerungen

Zur Feinstaubabscheidung bei Holzfeuerungen zwischen 100 kW und 2 MW kommen sowohl Trocken-Elektroabscheider als auch Gewebefilter zum Einsatz. Beide Verfahren sind von etablierten Herstellern verfügbar und zu beiden Anlagen existieren positive Betriebserfahrungen von Referenzanlagen, wenn auch erst mit einzelnen Anlagen und erst über wenige Heizperioden.

Beide Systeme weisen spezifische

Vor- und Nachteile auf. So erzielen Gewebefilter bei regulärem und stationärem Betrieb eine sehr effiziente Staubabscheidung mit Reingaskwerten unter 5 mg/m<sup>3</sup> (alle Angaben bis 1 MW bei 13 Vol.-% O<sub>2</sub>, ab 1 MW bei 11 Vol.-% O<sub>2</sub>).

Demgegenüber kann zwar auch mit Elektroabscheidern eine hohe Abscheideleistung erreicht werden. Bisher wurden Elektroabscheider allerdings oft auf 50 mg/m<sup>3</sup> Reingaskwert ausgelegt.

Die in der vorliegenden Studie geforderte Abscheidung auf 20 mg/m<sup>3</sup> kann jedoch auch mit Elektroabscheidern bei geeigneter Auslegung garantiert und bei guten Bedingungen zum Teil deutlich unterschritten werden.

Um die Feinstaubemissionen möglichst effizient zu vermindern und gleichzeitig auch den Einsatz optimierter Elektroabscheider zu ermöglichen, wird deshalb ein Grenzwert von 20 mg/m<sup>3</sup> als sinnvoll bewertet. Bei deutlich höheren Emissionsgrenzwerten besteht die Gefahr, dass die Feuerungen ohne Abscheider ausgelegt und für die Abnahmemessung mit idealem Brennstoff betrieben werden, im Praxisbetrieb jedoch keine ausreichende Verbesserung im Vergleich zur heutigen Situation erzielt wird. Ein Grenzwert von zum Beispiel 5 mg/m<sup>3</sup> würde dagegen unter Umständen nur für Gewebefilter garantiert werden, welche jedoch nur bedingt geeignet sind beim Einsatz von nassen Brennstoffen.

Bei Einführung eines Grenzwerts von 20 mg/m<sup>3</sup> ist davon auszugehen, dass die mit Feinstaubabscheidern ausgerüsteten Anlagen bei regulärem Betrieb Reingaskmissionen deutlich unter dem

Fortsetzung auf Seite

## Feinstaubabscheidung für automatische Feuerungen

Fortsetzung von Seite 000

Grenzwert aufweisen werden. So weisen drei Anlagen mit Elektroabscheidern oder Gewebefilter bei Abnahmemessungen Reingaswerte unter  $5 \text{ mg/m}^3$  auf.

Unter den heutigen Referenzanlagen sind Gewebefilter für kleine Leistungen wesentlich kostengünstiger als Elektroabscheider, verursachen jedoch höhere Betriebskosten infolge des Druckverlusts, des Bedarfs an Druckluft und der beschränkten Lebensdauer der Filter. Für Leistungen bis 1 MW resultieren für das Gewebefilter 15 % bis 20 % tiefere Gesamtkosten als für Elektroabscheider. Diese Differenz ist mit den Unsicherheiten der Betriebskosten allerdings als gering zu bewerten und sie berücksichtigt nicht, dass Gewebefilter höhere Anforderungen an die Feuerung und den Betrieb stellen.

Für eine einwandfreie Feinstaubabscheidung ist generell ein korrekter Betrieb der Feuerungsanlagen mit einem für die Feuerung zugelassenen Brennstoff notwendig. Gewebefilter sind besonders heikel in Bezug auf Taupunktunterschreitung, da dies Verklebungen und Schäden verursachen kann. Aus diesem Grund werden Gewebefilter in der Regel nur für den Einsatz von trockenen Brennstoffen und bei möglichst stationärem Betrieb der Feuerung empfohlen. Im Weiteren sind strengere Anforderungen an die Ausbrandqualität der abzuschneidenden Stäube zu erfüllen. Während für Elektroabscheider ein Gehalt von maximal 10 Gew% zulässig ist, ist für Gewebefilter ein Gehalt von maximal 2 Gew% einzuhalten, was für Heizanlagen als strenge Anforderung bewertet wird.

Bei beiden Verfahren besteht die Gefahr, dass die Staubemissionen im Praxisbetrieb durch die periodische Abreinigung sowie durch den Bypass-Betrieb oder die Abschaltung der Hochspannung bei Unterschreitung der Mindesttemperatur erhöht werden. Betriebszustände mit zu tiefen Abgastemperaturen treten vor allem beim Anfahren und bei Schwachlastbetrieb auf. Bei einer breiten Praxiseinführung von Feinstaubabscheidern ist deshalb sicher zu stellen, dass unwirksame Zustände auf ein Minimum reduziert und geeignet über-

wacht sowie eine Mindestverfügbarkeit des Abscheiders verlangt werden. Im Weiteren sollten auch die Abreinigung der Feinstaubabscheidung und die allfällig vorhandene automatische Kesselabreinigung erfasst werden.

Mit diesen Einschränkungen wird die Technik zur Feinstaubabscheidung bei automatischen Holzfeuerungen im Bereich ab rund 200 kW, sicher jedoch ab rund 400 kW als für eine breite Praxiseinführung verfügbar beurteilt. Sowohl Elektroabscheider als auch Gewebefilter sind als etablierte Technik auf dem Markt verfügbar, können einen Staubgrenzwert von  $20 \text{ mg/m}^3$  bei 13 Vol.-%  $\text{O}_2$  garantieren und in der Praxis deutlich unterschreiten. Selbst für Anlagen von 100 kW können entsprechende Abscheider eingesetzt werden. Die meisten derzeit angebotenen Systeme sind allerdings für größere Leistungen ausgelegt und für Anlagen mit lediglich 100 kW Leistung entsprechend teuer.

Sofern nur Produkte etablierter Hersteller berücksichtigt werden, weist das Gewebefilter im Leistungsbereich unter 1 MW geringfügig tiefere Gesamtkosten auf als ein Elektroabscheider. Die Investitionskosten der Technik werden für eine 200 kW-Anlage durch ein Gewebefilter um rund 24 % und durch einen Elektroabscheider um rund 34 % erhöht. Für eine 1 MW-Anlage beträgt die Kostenerhöhung rund 15 % für ein Gewebefilter und rund 22 % für einen Elektroabscheider.

Für eine 200 kW-Heizanlage verursacht ein Gewebefilter Zusatzkosten von 1,8 Ct./kWh, ein Elektroabscheider von 2,3 Ct./kWh. Wärme aus einer 200 kW-Ölheizung ist im Vergleich zu einer Holzheizung ohne Feinstaubabscheider rund 1 Ct./kWh kostengünstiger. Die Feinstaubabscheidung führt somit zu rund einer Verdreifachung der Mehrkosten für Wärme aus Holz im Vergleich zu Heizöl. Für Anlagen mit 500 kW verteuert ein Feinstaubabscheider die Wärme um rund 0,8 bis 1,1 Ct./kWh, für Anlagen mit 1 MW um rund 0,6 Ct./kWh.

Die meisten von etablierten Herstellern auf dem Markt angebotenen Systeme sind für Leistungen ab 300 kW bis 500 kW konzipiert. Vor allem für Leis-

**RAHMENBEDINGUNGEN FÜR DIE BERECHNUNGEN**

- ◆ Für Holz wird ein Endenergiepreis von 3 Ct./kWh angenommen, für Heizöl von 6 Ct./kWh. In Deutschland waren Waldhackschnitzel mit 35 % Wassergehalt im ersten Quartal 2006 zu einem Preis von im Mittel Euro 60 Euro/t mit einer Bandbreite zwischen Euro 35 Euro und 90 Euro verfügbar [8]. Dies entspricht rund 1,2 bis 3,0 Ct./kWh. Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wird die obere Bandbreite angenommen, damit der Einfluss auf die Kosten zur Realisierung zusätzlicher Holzheizwerke beurteilt werden kann. Heizöl kostete im Jahr 2006 für größere Liefermengen rund Euro 60 Euro pro 100 l oder 6,0 Ct./kWh.
- ◆ Die Kapitalkosten werden mit einem Kalkulationszinssatz von 5,0 % p.a. bestimmt, wobei für die Technik eine Kalkulationsdauer von 15 Jahren und für das Gebäude (inklusive Silo) von 30 Jahren angenommen wird.
- ◆ Für die Anlage wird ein Betrieb mit 2000 Vollbetriebsstunden pro Jahr angenommen.
- ◆ Die Investitions- und Betriebskosten der Wärmeerzeugung ohne Feinstaubabscheidung basieren auf einer Erhebung an über 30 Praxisanlagen sowie auf Erfahrungen von der Planung automatischer Holzheizwerke [9, 10]. Die detaillierten Annahmen sind in [1] ausgeführt und gelten für den Fall eines Neubaus bei korrekter Planung der Anlage auf ebenem und erschlossenem Grundstück.
- ◆ Die Investitions- und Betriebskosten zu den Feinstaubabscheidern basieren auf Informationen von ausgeführten Anlagen sowie auf Angebotsanfragen bei den Firmen Aerob-Beth (D), Eltecna (CH), Ionitec (A), Scheuch (A) und Trion (CH) [1]. Bei den Angaben wurden die nicht enthaltenen Zusatzkosten für Planung

und Peripherie-Aggregate abgeschätzt. Im Weiteren wurden die Angaben zu solchen Feinstaubabscheidern verwendet, von denen Praxiserfahrungen vorliegen, nämlich zu Platten-Elektroabscheider von Aerob-Beth und Ionitec sowie zu Gewebefiltern von Scheuch. Nicht berücksichtigt wurden ein Gewebefilter mit deutlich höheren Investitionskosten sowie ein Rohr-Elektroabscheider mit für Leistungen unter 500 kW deutlich tieferen Investitionskosten im Vergleich zu den Referenzanlagen.

- ◆ Für die Betriebskosten des Gewebefilters wurde gemäß Herstellerangabe eine Lebensdauer der Filterschläuche von fünf Jahren vorausgesetzt. Wenn mit trockenem Brennstoff und korrektem Betrieb eine längere Lebensdauer erzielt wird, verursacht das Gewebefilter somit tiefere Betriebskosten.

tungen unter 500 kW besteht deshalb voraussichtlich noch ein Potenzial zur Kostenreduktion, welches für Elektroabscheider bis zu 50 % betragen kann. Als Alternative ist zudem die Entwicklung von Metallgewebefiltern denkbar, welche im Vergleich zu Gewebefiltern deutlich unempfindlicher und kostengünstiger sein könnten. Zu beiden Techniken sind Entwicklungen im Gang (z. B. 11 bis 14).

Die Einführung verschärfter Staubgrenzwerte wird teilweise auch zu erhöhten Anforderungen bezüglich Feuerungstechnik und Anlagenregelung führen, da eine hohe Ausbrandqualität und ein möglichst stabiler Betrieb gewährleistet werden müssen. Bei Anlagen unter 1 MW liegen dazu bisher erst einzelne und bis anhin weitgehend positive Erfahrungen vor, während Erfahrungen von größeren Anlagen aus der Praxis zum Teil auch aufzeigen, dass die Anforderungen an Feuerung und Betrieb heute teilweise nicht eingehalten werden. Parallel zur Einführung verschärfter Grenzwerte wird deshalb eine systematische Untersuchung zum Praxiseinsatz und zur Erfassung der Anforderungen für die Feuerungsanlagen empfohlen.

### Literatur

- [1] Nussbaumer, Th.: Stand der Technik und Kosten der Feinstaubabscheidung für automatische Holzfeuerungen von 100 kW bis 2 MW, Bericht zu Händen Bundesamt für Umwelt (BAFU) und Amt für Umwelt Kanton Thurgau, Bezugsquelle Verenum Zürich, www.verenum.ch, Zürich 2006, ISBN 3-908705-13-4
- [2] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, BUWAL-Bericht 355, Bern 2004
- [3] Nussbaumer, Th.: Dieselruss und Holzfeinstaub grundverschieden, Holz-Zentralblatt, 131. Jg., Nr. 70 (2005), 932-933
- [4] Klippel, N.; Nussbaumer, T.: Feinstaubbildung in Holzfeuerungen und Gesundheitsrelevanz von Holzstaub im Vergleich zu Dieselruss, 9. Holzenergie-Symposium, 20. Oktober 2006, ETH Zürich, Verenum und Bundesamt für Energie, Zürich und Bern 2006, ISBN 3-908705-11-8
- [5] Fritz, W.; Kern, H.: Reinigung von Abgasen, Vogel, 2. Auflage, Würzburg 1990, ISBN 3-8023-0244-3
- [6] von Turegg, R.: Richtige und effiziente Staubabscheidung - Technologien und Potentiale, VDI-Bericht 1319, Thermische Biomassenutzung, Tagung Salzburg 23./24.4.1997, Düsseldorf 1997, 167 - 198
- [7] Jirkowsky, C., Pretzl, R., Malzer, Th., Sihorsch, K.: Verfahren zur Staubabscheidung bei Biomassefeuerungen ab 100 kW, 7. Holzenergie-Symposium, 18. Oktober 2002, Zürich, ISBN 3-908705-01-0, 53-72
- [8] Centrales Agrar-Rohstoff-Marketing und Entwicklungs-Netzwerk e.V.: Preisentwicklung bei Waldhackschnitzeln, www.carmen-ev.de, 2006
- [9] Good, J.; Nussbaumer, Th.; Jenni, A.; Bühler, R.: Systemoptimierung automatischer Holzfeuerungen, Bundesamt für Energie, Schlussbericht Projekt 44278, Bern 2005
- [10] Good, J. et al.: Planungshandbuch, Schriftenreihe QM Holzheizwerke, Band 4, C.A.R.M.E.N. e.V. Straubing, www.qmholzheizwerke.ch oder .de oder .at, 2004, ISBN 3-937441-94-8
- [11] Forsthuber, P.: Vorstellung eines Rohr-Elektrofilters, Fachgespräch Filtertechniken für Biomasseheizanlagen im kleinen und mittleren Leistungsbereich, C.A.R.M.E.N., Straubing, 30. November 2005, ISBN 3-937441-11-5, 39-43
- [12] Beer, S.: Entwicklung und Test einer Elektrofilteranlage für kleine Biomassekessel, Fachgespräch Filtertechniken für Biomasseheizanlagen im kleinen und mittleren Leistungsbereich, C.A.R.M.E.N., Straubing, 30. November 2005, ISBN 3-937441-11-5, 17-26
- [13] Heidenreich, R.: Abscheidung von Feinstäuben durch Ionisation und elektrostatische Abscheidung bei der thermischen Nutzung von Pflanzen in Kleinkesseln, Fachgespräch Filtertechniken für Biomasseheizanlagen im kleinen und mittleren Leistungsbereich, C.A.R.M.E.N., Straubing, 30. November 2005, ISBN 3-937441-11-5, 27-38
- [14] Winkel, O.: Der praxiserprobte Filter für Rauchgase aus kleinen und mittleren Biomasseverbrennungen, Fachgespräch Filtertechniken für Biomasseheizanlagen im kleinen und mittleren Leistungsbereich, C.A.R.M.E.N., Straubing, 30. November 2005, ISBN 3-937441-11-5, 45-59