



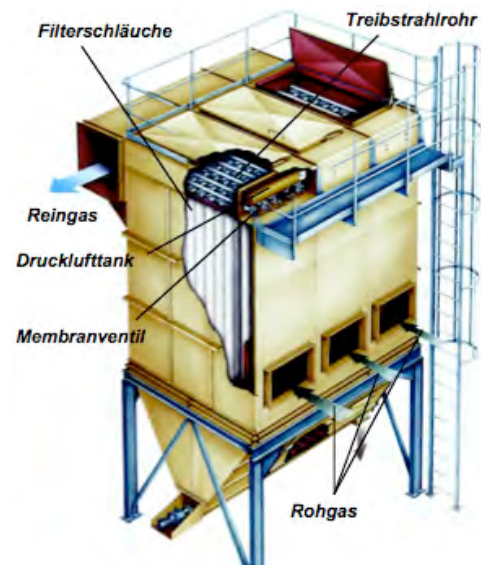
Verenum  
Langmauerstrasse 109  
CH – 8006 Zürich  
www.verenum.ch

## Stand der Technik und Kosten der Feinstaubabscheidung für automatische Holzfeuerungen von 100 kW bis 2 MW

Thomas Nussbaumer



Elektroabscheider (Aerob-Beth)



Gewebefilter (Scheuch)

Auftraggeber:

Bundesamt für Umwelt, Abteilung Luftreinhaltung

Kanton Thurgau, Amt für Umwelt, Abteilung Luftreinhaltung

Zürich, 24. August 2006

ISBN 3-908705-13-4

Thomas Nussbaumer: Stand der Technik und Kosten der Feinstaubabscheidung für automatische Holzfeuerungen von 100 kW bis 2 MW.  
Bericht zu Handen Bundesamt für Umwelt (BAFU) und Amt für Umwelt Kanton Thurgau (AFU Thurgau). Zürich 2006, ISBN 3-908705-13-4

Bezugsquelle: [www.verenum.ch](http://www.verenum.ch)

Der Bericht wurde im Auftrag des Bundesamts für Umwelt und des Amts für Umwelt Kanton Thurgau verfasst.

Für den Inhalt ist der Autor verantwortlich.

# Inhalt

<b>1 Zusammenfassung .....</b>	<b>4</b>
<b>2 Ausgangslage und Zielsetzung.....</b>	<b>5</b>
2.1 Ausgangslage .....	5
2.2 Zielsetzung.....	5
<b>3 Eigenschaften von Feinstaub aus Holzfeuerungen.....</b>	<b>6</b>
<b>4 Grundlagen der Staubabscheidung .....</b>	<b>10</b>
4.1 Übersicht.....	10
4.2 Elektroabscheider .....	13
4.3 Gewebefilter .....	16
4.4 Massnahmen zum Praxiseinsatz.....	18
4.5 Erfahrungen von Anlagenbetreibern.....	19
<b>5 Kosten und Wirtschaftlichkeit .....</b>	<b>20</b>
5.1 Methode .....	20
5.2 Kostenangaben zur Wärmeerzeugung.....	21
5.3 Kostenangaben für Feinstaubabscheider.....	23
5.4 Annahmen.....	25
5.5 Investitionskosten mit und ohne Abscheider .....	27
5.6 Wärmegestehungskosten mit und ohne Abscheider .....	30
<b>6 Schlussfolgerungen .....</b>	<b>34</b>
<b>7 Anhang .....</b>	<b>40</b>
7.1 Angefragte Informationen für Offertanfrage.....	40
7.2 Pflichtenheft für Offertanfrage .....	41
7.3 Liste der angefragten Firmen .....	42
<b>8 Literatur.....</b>	<b>43</b>

# 1 Zusammenfassung

Da die Immissionsgrenzwerte an gesundheitsschädlichem Feinstaub seit Jahren überschritten werden und die Holzfeuerungen überproportional dazu beitragen, sind Massnahmen zur Feinstaubminderung aus Holzfeuerungen gefordert. Im Aktionsplan des Bundes ist deshalb die Einführung verschärfter Emissionsgrenzwerte vorgesehen, welche den Einsatz von Feinstaubabscheidern vorerst für Anlagen ab 1 MW und zeitlich verzögert auch für kleinere Anlagen erforderlich macht. Die untere Leistungsgrenze steht dabei noch nicht definitiv fest. 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 5 Rp./kWh für Energieholz verteuert der Einsatz von heute in Referenzanlagen eingesetzten Feinstaubabscheidern die Wärme aus Holz im Fall eines Neubaus in etwa wie folgt (Tabelle 1.1):

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 11%, für 200 kW um 17% bis 21% und für 100 kW um 28% bis 30%.

Die tieferen Werte gelten für Gewebefilter, welche geringfügig tiefere 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.

Tabelle 1.1 Wärmegestehungskosten für Heizöl sowie für Holz mit und ohne Feinstaubabscheider sowie prozentuale Kostenerhöhung durch Feinstaubabscheider. Angaben gelten inklusive Gebäude und exklusive Wärmeverteilung für allfälliges Wärmenetz sowie für Brennstoffpreise von 5 Rp./kWh für Holz und 8 Rp./kWh für Heizöl und einen Kapitalzins von 5% p.a..

	Heizöl	Holz	Holz mit Elektroabscheider		Holz mit Gewebefilter	
	[Rp./kWh]	[Rp./kWh]	[Rp./kWh]	[%]	[Rp./kWh]	[%]
100 kW	15.5	19.6	25.5	30	25.1	28
200 kW	13.9	17.3	20.9	21	20.3	17
500 kW	12.4	15.0	16.8	11	16.3	9
1 MW	11.8	12.1	13.1	8	13.0	7
2 MW	11.2	10.7	11.3	6	11.3	5

## **2 Ausgangslage und Zielsetzung**

### **2.1 Ausgangslage**

Feinstaub kleiner 10 Mikrometer (Particulate Matter PM 10) ist lungengängig und kann über zahlreiche Mechanismen Gesundheitsschädigungen verursachen. Da die Immissionsgrenzwerte an Feinstaub in der Schweiz seit Jahren grossflächig und zum Teil drastisch überschritten werden, besteht erheblicher Handlungsbedarf zur Reduktion der Feinstaub-Emissionen.

Feinstaub aus Verbrennungsprozessen ist potenzieller Träger von kanzerogenen Stoffen und deshalb besonders kritisch zu beurteilen. Die Hauptquellen von Feinstaub aus Verbrennungsprozessen sind Dieselmotoren und Holzfeuerungen [1], welche in der Schweiz etwa zu gleich hohen Feinstaubfrachten beitragen. Während dank Partikelfiltern bei Dieselmotoren eine drastische Reduktion des Dieselrusses erwartet wird, ist bei den Holzfeuerungen bis anhin kein Trend zur Reduktion der Feinstaubemissionen abzusehen. So weisen selbst neu installierte automatische Holzfeuerungen typische Staubemissionen zwischen  $50 \text{ mg/m}^3$  bis  $150 \text{ mg/m}^3$  (bei 13 Vol.-%  $\text{O}_2$ ) auf.

Für Holzfeuerungen bis 5 MW ist der derzeit noch gültige Grenzwert nach Luftreinhalte-Verordnung (LRV) von  $150 \text{ mg/m}^3$  (bei 11 bzw. 13 Vol.-%  $\text{O}_2$ ) um ein Vielfaches höher als bei anderen Verbrennungsanlagen. Voraussichtlich ab 2007 wird vom Bund eine Verschärfung des Grenzwertes auf  $20 \text{ mg/m}^3$  (bei 11 Vol.-%  $\text{O}_2$ ) für Holzfeuerungen ab 1 MW eingeführt. Zeitlich verzögert ist zudem die Einführung eines Grenzwertes von  $30 \text{ mg/m}^3$  (bei 13 Vol.-%  $\text{O}_2$ ) für Anlagen unter 1 MW vorgesehen, wobei die genauen Daten noch nicht feststehen.

Da Holz als erneuerbarer Energieträger bei nachhaltiger Waldnutzung  $\text{CO}_2$ -neutral genutzt werden kann, trägt die Substitution fossiler Energieträger durch Holz zur Verminderung des weiteren klimawirksamen  $\text{CO}_2$ -Anstiegs bei. Aus diesem Grund ist eine vermehrte Nutzung von Holz als Rohstoff und Energieträger zum Ersatz fossiler Ressourcen anzustreben, was auch vom Bund unterstützt wird. Seit Erhöhung des Ölpreises wird Energieholz zudem auch aus ökonomischen Gründen vermehrt eingesetzt. Falls jedoch vermehrt Energieholz ohne Massnahmen zur Staubminderung genutzt wird, führt dies zu einem weiteren Anstieg des heute bereits hohen Anteils an Feinstaub aus Holzfeuerungen. Dies gilt selbst nach Einführung eines Grenzwertes für Anlagen über 1 MW, da grossteils automatische Holzfeuerungen zwischen 200 kW bis 1000 kW realisiert werden, welche den typischen Leistungsbereich grosser Einzelverbraucher wie Schulhäuser oder kleiner Wärmeverbunde abdecken.

### **2.2 Zielsetzung**

Ziel der vorliegenden Studie ist eine Bewertung des Standes der Technik sowie der Wirtschaftlichkeit von Feinstaubabscheidern für Holzfeuerungen im Leistungsbereich von 100 kW bis 2 MW. Die Bewertung soll als Basis dienen für den Entscheid, ob auch für Anlagen unter 1 MW eine Verschärfung des Staubgrenzwertes so eingeführt werden soll, dass der Einsatz von Feinstaubabscheidern in der Regel erforderlich wird.

### 3 Eigenschaften von Feinstaub aus Holzfeuerungen

Bei der Verbrennung von Holz können verschiedene Arten von Feinstaub emittiert werden, welche im Folgenden in zwei Kategorien unterteilt werden:

1. Brennbare Partikel:
  - organische Verbindungen, welche durch Zersetzung des Holzes freigesetzt, jedoch nicht vollständig oxidiert werden
  - Russ und weitere organische Verbindungen, welche durch Synthese in der Flamme gebildet und in der Brennkammer nicht vollständig oxidiert werden
  - Holzbestandteile, welche aus dem Glutbett ausgetragen werden
  
2. Unbrennbare Partikel:
  - Anorganische Feinststäube, insbesondere Salze, welche durch Verdampfung von in der Asche enthaltenen Mineralstoffen ins Abgas gelangen und dort re-kondensieren
  - Anorganische Grobpartikel, welche durch Mitreißen von Rostasche ins Abgas gelangen
  - Metallverbindungen und insbesondere Schwermetalle, welche vor allem in kontaminiertem Holz in relevanten Mengen enthalten sind.

Russ und weitere organische Verbindungen sind die Folge einer unvollständigen Verbrennung. Anorganische Partikel entstehen dagegen durch Verdampfung von anorganischen Elementen wie Kalium und Calcium, welche bei der Abkühlung im Abgas zu salzartigen Partikeln wie Kaliumchlorid oder Calciumkarbonat führen.

Organische Partikel können durch hohe Verbrennungstemperaturen und gute Vermischung zwischen Verbrennungsluft und brennbaren Gasen auf ein sehr geringes Mass reduziert werden. Während handbeschickte Holzfeuerungen vor allem bei unsachgemäßem Betrieb hohe Emissionen an Russ vpm oft  $50 \text{ mg/m}^3$  bis über  $500 \text{ mg/m}^3$  verursachen können, weisen automatische Holzfeuerungen bei regulärem Betrieb nur sehr geringe Russemissionen von meist weniger als  $5 \text{ mg/m}^3$  auf. Dagegen weisen automatische Holzfeuerungen vergleichsweise hohe Emissionen an anorganischen Partikeln auf, da deren Freisetzung durch die hohen Temperaturen im Glutbett begünstigt wird. Anorganische Verbindungen machen deshalb in der Regel mehr als 95 Gew.-% der Staubemissionen bei automatischen Holzfeuerungen auf, während handbeschickte Holzfeuerungen auf Grund der tieferen Verbrennungstemperaturen und der geringeren Wirkung zum Mitreißen feiner Holzpartikel, welche bei automatischen Holzfeuerungen zwar bis zu einem gewissen Teil im Flug verbrennen, aber dabei die mitgeführten anorganischen Substanzen ins Abgas transportieren.

Automatische Holzfeuerungen weisen deshalb bei guter Betriebsweise vor allem salzartige Staubemissionen auf, welche kleiner als 1 Mikrometer sind und ein Maximum der Partikelanzahl von knapp unter 0,1 Mikrometer aufweisen (Bild 3.1, Bild 3.2 und Bild 3.3). Bild 3.2 zeigt qualitativ die Anteile der verschiedenen Partikelarten aus Holzfeuerungen, wobei für automatische Feuerungen der Russ in der Regel sehr gering ist. Bild 3.3 zeigt die Anzahlverteilung typischer Staubemissionen von Holzfeuerungen im Vergleich zu Dieselruss und Umgebungsluft im relevanten Bereich bis 10 Mikrometer. Einerseits ist erkennbar, dass die Staubkonzentration im Abgas von Holzfeuerungen und Diesel-

motoren mehr als einen Faktor 1000 höher sind als in der Umgebungsluft. Im Weiteren zeigt der Vergleich, dass beide Emissionsquellen ein Anzahlmaximum für Partikel um rund 0,1 Mikrometer und somit ähnliche Korngrößen aufweisen.

Sofern ein erhöhtes Mitreissen aus dem Glutbett stattfindet, werden zusätzlich Partikel mit Korngrößen von über 1 Mikrometer emittiert. Diese grobe Flugasche kann teilweise in einem Multizyklon abgetrennt werden, während Stäube unter 1 Mikrometer durch Zyklone praktisch nicht abscheidbar sind. Das Mitreissen kann auch zum Austrag von Funken führen, welche insbesondere in Gewebefiltern zu einer Zerstörung der Filterschläuche führen kann. Daneben führt die Verbrennung von Rinde auch zu anorganischen Partikeln über 1 Mikrometer. Die Emission an Russ kann dagegen weitgehend vermieden werden. Sofern sie auftritt, führt sie zu zusätzlichen Partikeln von über 0,1 Mikrometer. Da solche Partikel brennbar sind, können sie bei Ablagerung in trocken betriebenen Staubabscheidern – also sowohl in Gewebefiltern als auch in trockenen Elektroabscheidern – zu Bränden führen, weshalb zum Betrieb von solchen Staubabscheidern meist eine Beschränkung des maximal zulässigen Kohlenstoffgehalts der abzuscheidenden Flugasche verlangt wird. Bei Elektroabscheidern werden oft maximal 5 Gew.-% Kohlenstoffgehalt vorgeschrieben, bei Gewebefiltern gar lediglich 2 Gew.-% gefordert. Bei regulären Bedingungen sind in der Regel über 90% der Partikel aus automatischen Holzfeuerungen im lungengängigen Bereich unter 10 Mikrometer (PM 10) zu finden, der Hauptteil der Masse ist sogar kleiner als 1 Mikrometer.

Beim Vergleich der Partikel aus automatischen Holzfeuerungen und aus Dieselmotoren ist allerdings zu beachten, dass Dieselmotoren praktisch ausschliesslich Russ emittieren, während die Partikel aus einer sachgemäss betriebenen automatischen Holzfeuerungen hauptsächlich salzartige Verbindungen sind, was nach Bild 3.5 bereits visuell erkennbar ist. Eine laufende Untersuchung zur Gesundheitswirkung verschiedener Verbrennungspartikel zeigt denn auch, dass salzartige Partikel aus einer automatischen Holzfeuerung wesentlich geringere Toxizität für Zellen aufweisen als Dieseleruss (Bild 3.4). Gleichzeitig ist auch zu beachten, dass Holzruß aus sehr unvollständiger Holzverbrennung unter schlechten Bedingungen in einem Holzofen noch wesentlich höhere Toxizität als Dieseleruss aufweisen kann [Klippel et al. 2006].

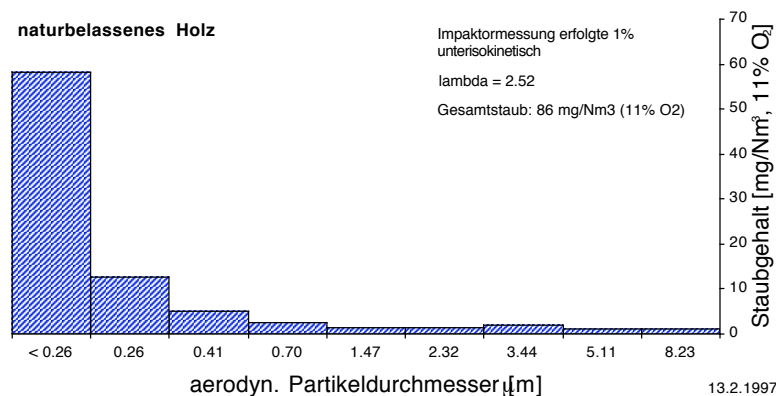


Bild 3.1 Partikelgrößenverteilung (Massenverteilung mittels Kaskadenimpaktor) bei der Verbrennung von naturbelassenem Holz in einer Vorschubrostfeuerung [Hasler und Nussbaumer 1997].

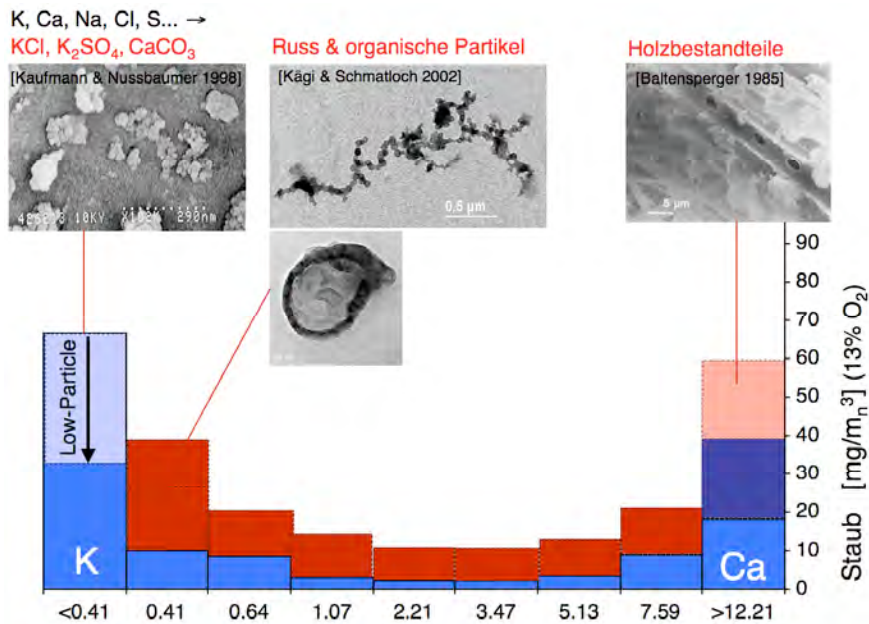


Bild 3.2 Partikelgrößenverteilung (Massenverteilung mittels Kaskadenimpaktor) bei der Verbrennung von naturbelassenem Holz: Qualitativer Vergleich der verschiedenen Partikeltypen: Blau (Grundbeitrag bei automatischen Holzfeuerungen): Partikel aus Aschekomponenten im Brennstoff, bei Holz vorwiegend Kalium-Salze mit Korngrößen unter 0,4 Mikrometer (Anzahlmaximum bei unter 0,1 Mikrometer), bei Rinde zusätzlich Calcium-Verbindungen mit Korngrößen über 5 bis über 10 Mikrometer. Hellblauer Anteil: Durch Temperaturreduktion im Glutbett kann die Verdampfung anorganischer Verbindungen unterdrückt und die Bildung von Kalium-Salzen verringert werden („Low-Particle-Betrieb“ automatischer Holzfeuerungen, oft systembedingt bei handbeschickten Holzöfen). Rot: Russ und organische Partikel bei unvollständiger Verbrennung. Hellrot: Austrag von Holzbestandteilen, im Beispiel in einem Cheminée.

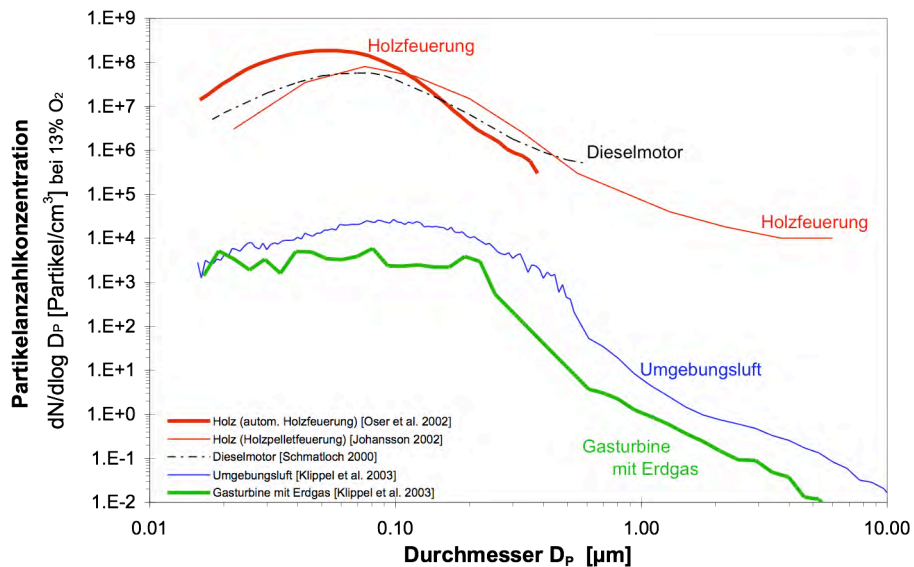


Bild 3.3 Korngrößenverteilung von Feinstaub angegeben als Anzahlkonzentration für Umgebungsluft im Vergleich zum Abgas einer mit Erdgas befeuerten Gasturbine und dem Abgas von zwei Holzfeuerungen und einem Dieselmotor. Messungen von [Klippel et al. 2003] mit SMPS und OPC, wobei Umgebungsluft und Gasturbine in der Nähe von Baden (CH) gemessen wurden. Messungen [Oser et al. 2000] und [Schmatloch 2000] mit SMPS, Messungen [Johansson 2002] mit ELPI umgerechnet auf Stokes-Durchmesser.

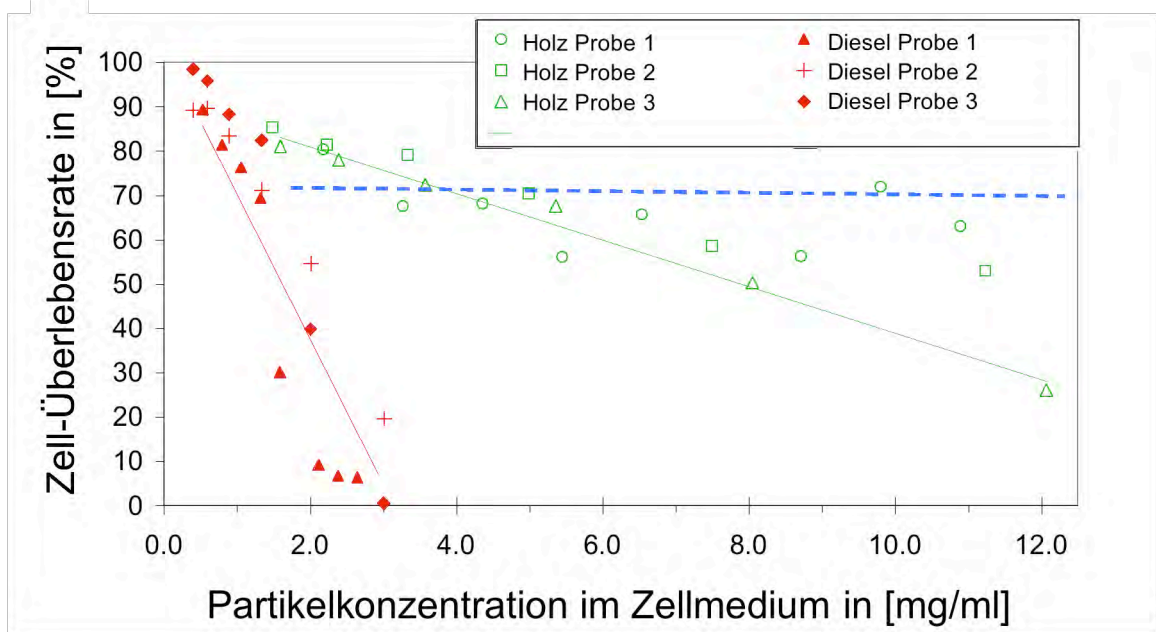


Bild 3.4 Vergleich der Zell-Überlebensrate von Dieseleruss und Partikeln aus einer automatischen Holzfeuerung in Zytotoxizitätstests nach [Nussbaumer et al. 2005].

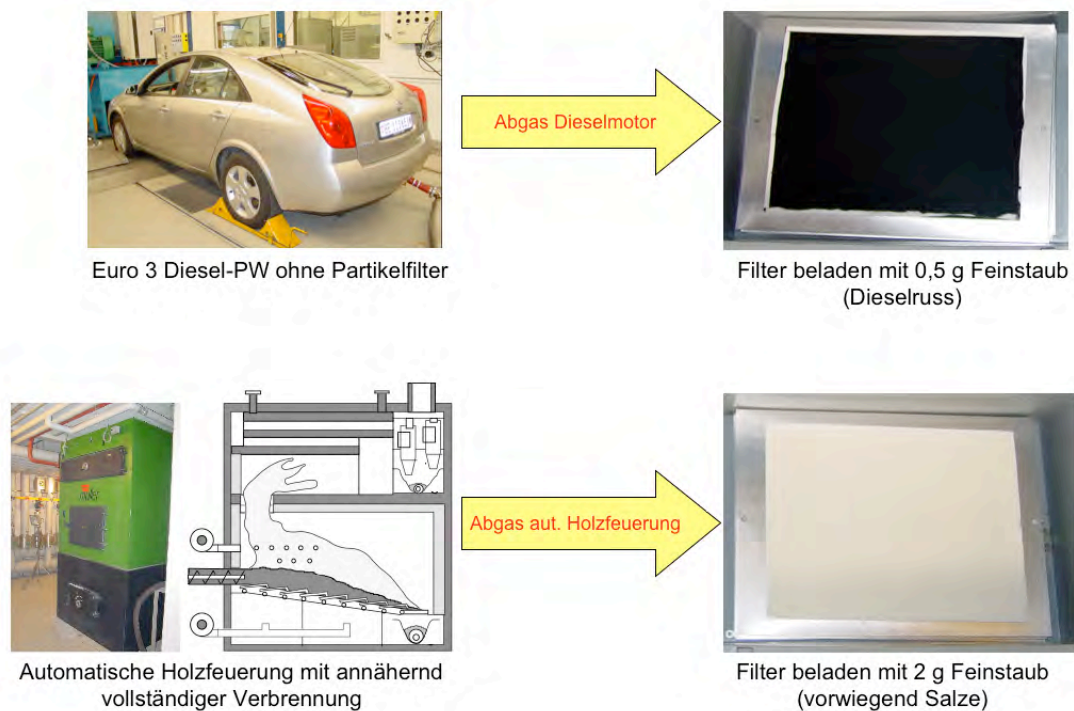


Bild 3.5 Versuchsanordnungen und mit Partikel beladene Filter für Zelltests aus Dieselmotor und aus automatischer Holzfeuerung [Nussbaumer et al. 2005].

# 4 Grundlagen der Staubabscheidung

## 4.1 Übersicht

Die Verfahren zur Staubabscheidung beruhen auf folgenden Mechanismen (Bild 4.1):

- Fliehkraftabscheidung (Zyklon, Multizyklon)
- Elektrische Feldkräfte (Trocken- und Nass-Elektroabscheider)
- Filtration, Gitterwirkung und Haftkäfte (Gewebefilter, Metallfilter, Schüttschichtfilter, Keramikfilter)
- Nassenststaubung, Nasswäscher (Grenzflächenkräfte).

Tabelle 4.1 zeigt eine Zusammenstellung der wichtigsten Merkmale von Feinstaubabscheidern nach [von Turegg 1997], welche für verschiedenste Anwendungen gilt und nicht spezifisch für Feinstaub aus Holzfeuerungen ausgerichtet ist. Bild 4.2 zeigt typische Abscheidegrade bei Anwendungen an Holzfeuerungen in Abhängigkeit der Korngrösse nach [Jirkowsky 2004].

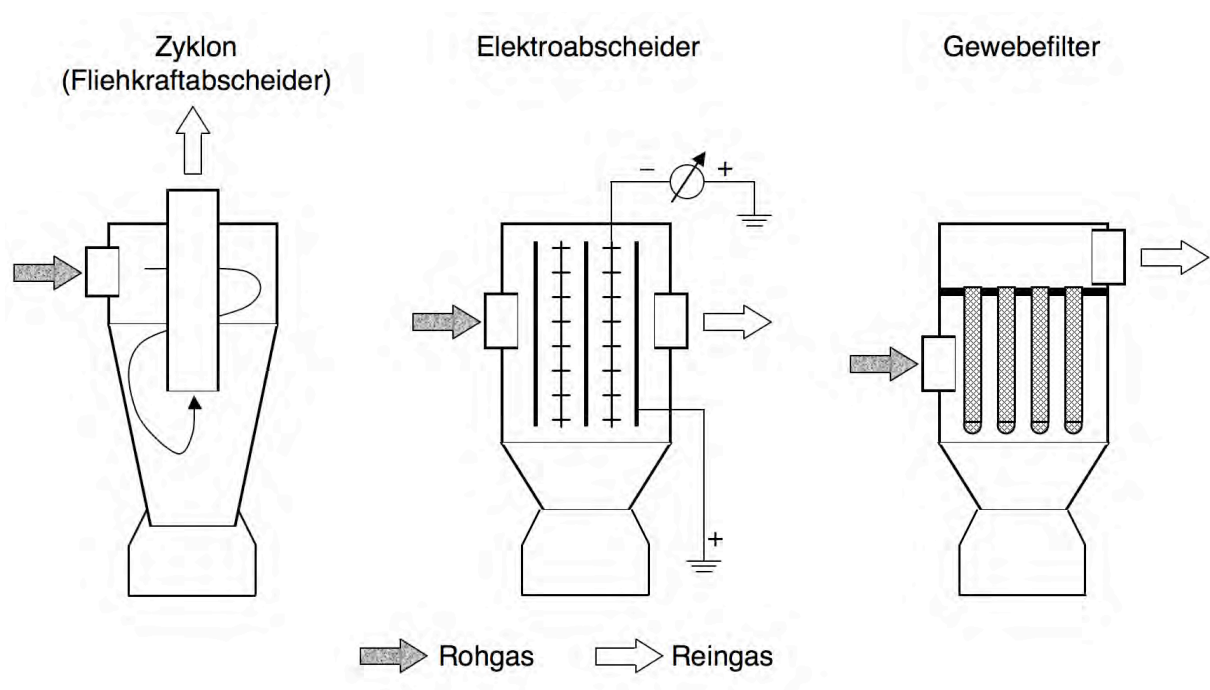


Bild 4.1 Prinzip von Zyklon, Elektroabscheider und Gewebefilter.

Tabelle 4.1 Typische Merkmale von Staubabscheidungsverfahren nach [von Turegg 1997].<sup>1</sup>

Abscheideprinzip	Abscheidegrad %	Gasgeschw. m/s	Druckverlust mbar	Energiebedarf kWh / 1000 m <sup>3</sup> /h
Zyklon	85 – 95	15 – 25	6 – 15	0,3 – 0,65
Gewebefilter	99 – 99,99	0,5 – 5	5 – 20	0,75 – 1,9
Trocken-Elektroabscheider	95 – 99,99	0,5 – 2,0	1,5 – 3,0	0,26 – 1,96
Nass-Elektroabscheider	95 – 99,99	0,5 – 2,0	1,5 – 3,0	0,17 – 2,3

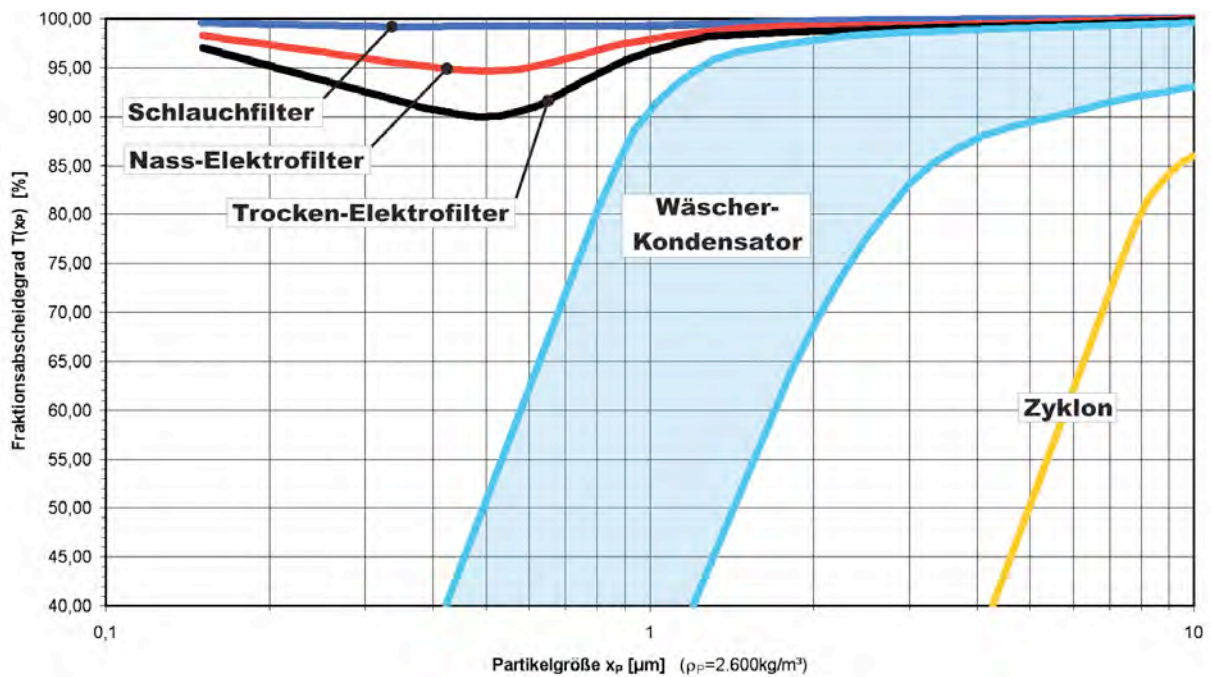


Bild 4.2 Fraktionsabscheidegrad der Staubabscheidungsverfahren für Holzfeuerungen [Jirkowsky 2004]

<sup>1</sup> Die Zusammenstellung nach Tabelle 4.1 ist nicht spezifisch für Feinstaub aus Holzfeuerungen ausgerichtet. Der für Zyclone angegebene Abscheidegrad gilt für Partikel  $> 5 \mu\text{m}$ . Für Feinstaub  $< 1 \mu\text{m}$  geht der Abscheidegrad gegen 0. Aufgrund der geringen Korngrösse von Feinstaub aus Holzfeuerungen ist der Abscheidegrad für Zyclone deshalb meist deutlich geringer als in der Tabelle angegeben, was auch aus Bild 4.1 hervorgeht. In Bezug auf Gewebefilter und Elektroabscheider ist zu beachten, dass die Werte am oberen Rand der in der Tabelle angegebenen Bereiche von Abscheidegrad und Energiebedarf in der Praxis nicht relevant sind. Die für Holzfeuerungen üblichen und zur Einhaltung der geforderten Grenzwerte notwendigen Abscheidegrade bewegen sich an der unteren Bandbreite der Bereiche, bei welchem Elektroabscheider einen deutlich geringeren Energiebedarf als Gewebefilter aufweisen.

**Fliehkraftentstauber** weisen nur für grobe Partikel über rund 5 µm eine relevante Abscheidewirkung von deutlich über 50% auf. Bei automatischen Holzfeuerungen mit üblichen Holzbrennstoffen und guten Verbrennungsbedingungen kann mit Multizyklonen in der Regel der heutige LRV-Grenzwert von 150 mg/m<sup>3</sup> bei 13 Vol.-% O<sub>2</sub> eingehalten werden. Daneben können Multizyklone als Vorabscheider eingesetzt werden zur Verringerung der Staubfracht für eine nachgeschaltete Feinstaubabscheidung. Bei Gewebefiltern können Zyklone auch als Vorabscheider zum Schutz vor Funkenflug, welcher zu Glimmbrand und einer Zerstörung der Filterschläuche führen kann, eingesetzt werden. Bei Elektroabscheidern werden Zyklone als Vorabscheider eingesetzt, wenn unverbrannte Grobpartikel mit Korngrößen über 5 µm im Abgas enthalten sind, da diese im Elektroabscheider kaum oder nur unzureichend abgeschieden werden. Hohe Konzentrationen an entsprechenden Grobpartikeln entstehen durch Mitreißen aus dem Glutbett und sind damit meist die Folge einer inhomogenen Luftverteilung durch den Rost oder die Retorte.

**Wäscher und Kondensatoren** weisen für Partikel aus Holzfeuerungen ebenfalls nur beschränkte Abscheidegrade auf und kommen zur Staubabscheidung meist nur in Kombination mit einem nachgeschalteten Nass-Elektroabscheider zum Einsatz.

Zur Feinstaubabscheidung bei automatischen Holzfeuerungen bieten sich damit in erster Linie **Elektroabscheider und Gewebefilter** an, welche im Weiteren ausführlich behandelt werden. Zum Schutz dieser Feinstaubabscheider wird derzeit meist ein Multizyklon als Vorabscheider eingesetzt. Dies wird zum Teil von den Lieferanten der Feinstaubabscheider empfohlen. Teilweise ist der Einsatz eines Vorabscheiders auch erforderlich, um den Garantiewert bezüglich Anteil Unverbranntem im abzuschheidenden Feinstaub einzuhalten. Grundsätzlich ist allerdings davon auszugehen, dass bei optimaler Auslegung, geeigneter Regelung und korrektem Betrieb der Feuerungsanlagen eine Vorabscheidung nicht zwingend erforderlich wäre, wodurch die Investitions- und Betriebskosten für den Zyklon eingespart werden könnten. Das entsprechende Sparungspotenzial ist in der nachfolgenden Betrachtung nicht berücksichtigt, da sicherheitshalber von einer Anlage mit Multizyklon als Vorabscheider ausgegangen wird.

## 4.2 Elektroabscheider

**Elektroabscheider** erzielen sehr hohe Abscheidegrade für Partikel über 1 Mikrometer sowie für solche kleiner 0,1 Mikrometer, während der Abscheidgrad für Korngrößen zwischen rund 0,2 und 0,8 Mikrometer ein Minimum aufweist Bild 4.2. Der Gesamtabscheidegrad ist abhängig von der Hochspannung und der Gasverweilzeit bzw. Filterflächenbelastung im Abscheider. Bei gegebenem Gasvolumenstrom kann die Abscheidung somit durch Vergrößerung der Filterfläche erhöht werden. Für Feinstaub aus Holzfeuerungen werden typische Gesamtabscheidegrade von 90% bis 95% erzielt, während noch höhere Abscheidegrade zu unverhältnismässig grossen Filterflächen führen würden.

Da die Partikel durch elektrische Feldkräfte zur Niederschlagselektrode bewegt werden, weisen Elektroabscheider nur sehr **geringe Druckverluste** auf. Bei automatischen Holzfeuerungen reicht in der Regel der konventionelle Abgasventilator aus, da der Druckverlust des Elektroabscheiders den Gesamtdruckverlust nur geringfügig erhöht. Im Weiteren sind Elektroabscheider **unempfindlich auf Funken**. Allerdings kann ein hoher Russgehalt im Abgas zu brennbaren Ablagerungen und zu einem Brand im Elektroabscheider führen.

Elektroabscheider werden in Platten- oder Röhrenbauweise ausgeführt. Für automatische Holzfeuerungen sind **Platten-Elektroabscheider als etablierte Technik** verfügbar, welche mit Klopfeinrichtungen periodisch abgereinigt werden. Als Alternative werden Rohrelektroabscheider angeboten, bei denen die Abreinigung durch mechanische Bürsten erfolgt. In Bezug auf die Abscheidewirkung weisen Rohrelektroabscheider eine günstige Geometrie auf, bis anhin werden sie allerdings von etablierten Herstellern von Elektroabscheidern nicht eingesetzt, weil kein einfaches Abreinigen durch Klopfen möglich ist. Eine Sonderbauform bilden Nass-Elektroabscheider, bei welchen die Abreinigung durch einen Flüssigkeitsfilm erfolgt. Diese Bauart ist apparativ aufwändig und kommt für den betrachteten Leistungsbereich bis anhin nicht zum Einsatz. Vorteil der Nass-Abreinigung ist, dass bei Abkühlung des Abgases unter den Taupunkt ausfallendes Kondensat nicht zu Verklebungen führen kann. Nass-Elektroabscheider können deshalb auch in Kombination mit einer Kondensationsstufe eingesetzt werden.

Bei Trocken-Elektroabscheidern ist eine **Taupunktunterschreitung unerwünscht**, da sie einerseits zu einem Kurzschluss führen kann, weil die elektrische Leitfähigkeit der Ablagerungen auf den Isolatoren durch die Feuchtigkeit unzulässig erhöht wird. Zum Andern kann die Abreinigung der an der Niederschlagselektrode abgelagerten Staubschicht durch Feuchtigkeitsaufnahme behindert werden. Zur Verhinderung von Störungen oder Schäden durch Taupunktunterschreitung wird bei Platten-**Elektroabscheidern** meist eine elektrische **Beheizung** der aus dem Gasstrom zurückversetzten Isolatoren eingesetzt. Um die Ablagerung klebriger, schlecht abzureinigender Stäube zu verhindern, besteht zudem die Möglichkeit, die Hochspannung bei Unterschreitung des Taupunkts auszuschalten. Bei dem derzeit angebotenen **Rohrelektroabscheider** sind die Isolatoren im Gasstrom angeordnet, weshalb zur Vermeidung einer Taupunktunterschreitung im Abscheider ein Bypass vorhanden ist, welcher bei Unterschreitung einer Mindesttemperatur von 80°C aktiviert wird.

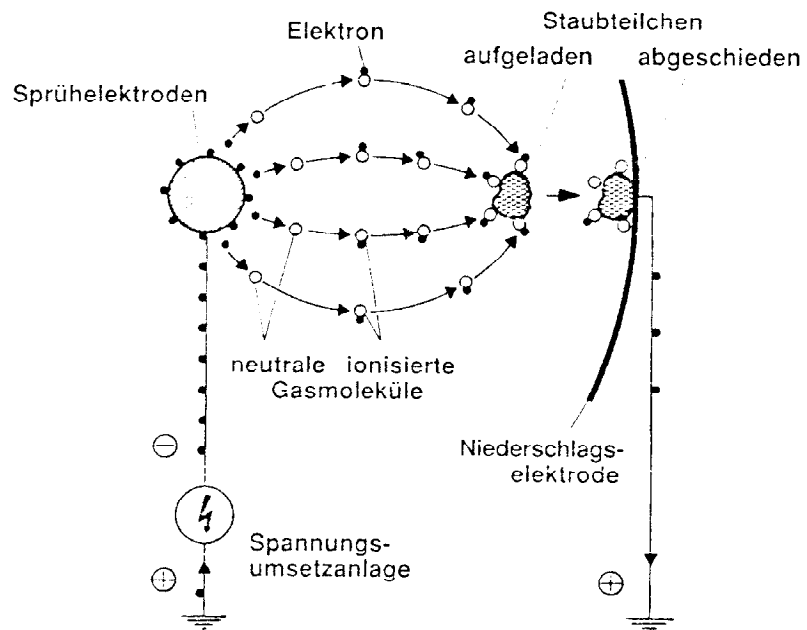


Bild 4.3 Funktionsprinzip der elektrostatischen Staubabscheidung.

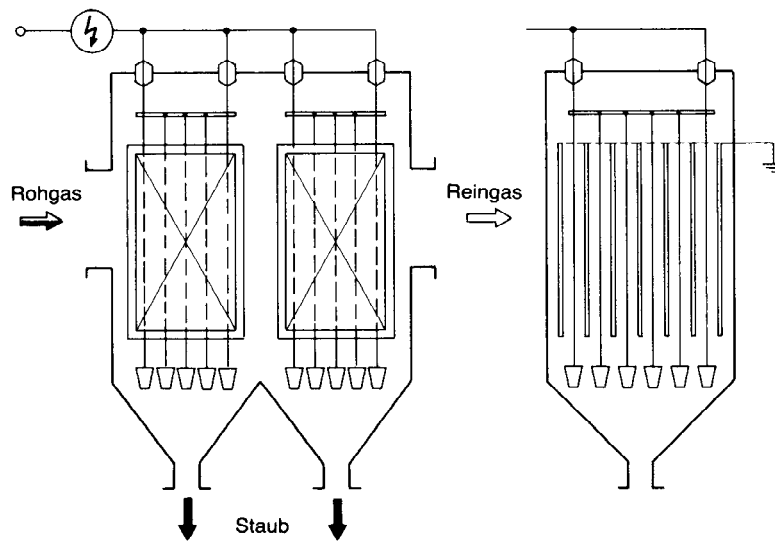


Bild 4.4 Aufbau eines Zwei-Kammer Plattenelektroabscheiders [Fritz und Kern 1990]

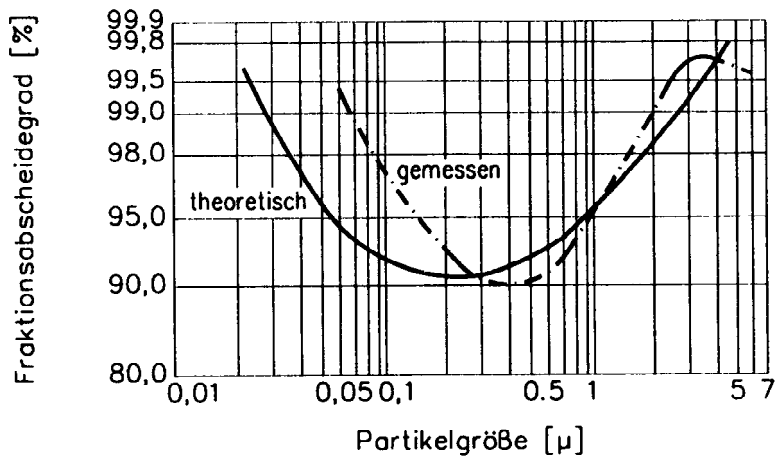


Bild 4.5 Fraktionsabscheidegradeurve beim trockenen Elektroabscheider nach [von Turegg 1997].

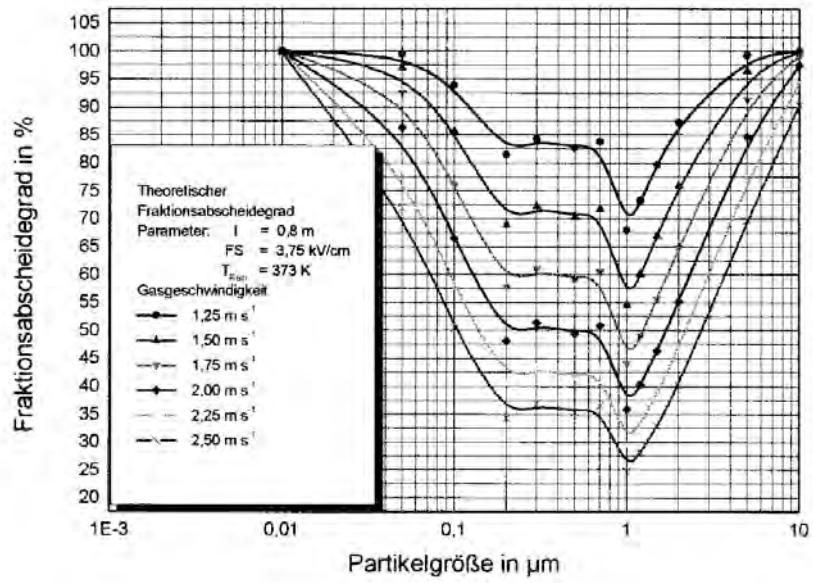


Bild 4.6 Fraktionsabscheidegradeurve beim trockenen Elektroabscheider in Abhängigkeit der Gasgeschwindigkeit nach [Heidenreich 2005].

## 4.3 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 Gewebefilter eine erhöhte Ventilatorleistung und einen erhöhten Energieverbrauch für die Ventilatoren erfordern. Die auf dem Filter aufgebaute Staubschicht muss periodisch abgereinigt werden, was in der Regel mit Zugabe von **Druckluft** entgegen der Strömungsrichtung erfolgt. Der Einsatz von Gewebefiltern setzt deshalb die Verfügbarkeit von Druckluft voraus. Da bei modernen automatischen Holzfeuerungen meist auch Druckluft zur Kesselabreinigung eingesetzt wird, kann die Druckluftverwendung jedoch kombiniert werden. Die für die Elektroabscheider geschilderte Problematik der Taupunktunterschreitung ist bei Gewebefiltern von noch grösserer Bedeutung, da bereits ein einmalige **Taupunktunterschreitung** des unter Umständen durch Aufbau einer klebrigen Schicht auf dem Filter zu einer Zerstörung des Filtermaterials führen kann, was zu sehr hohen Reperaturkosten und einer Betriebsunterbrechung für das Filter führt. Zur Vermeidung von Taupunktunterschreitungen im Filter werden Gewebefilter für Holzfeuerungen deshalb mit einem Temperatur geregelten Bypass ausgerüstet. Die Freigabetemperatur wird dabei zum Beispiel gemäss Auslegungsbedingungen von Scheuch auf 120°C bei einem Brennstoffwassergehalt von 10% bzw. 140°C bei einem Wassergehalt von 50% festgelegt, so dass im Vergleich zu Trocken-Elektroabscheidern mit einem erhöhten Anteil des Anlagenbetriebs ohne Abscheidewirkung zu rechnen ist. Der Vorteil der tieferen Reingasemissionen von Gewebefiltern im Vergleich zu Elektroabscheidern kann in der Praxis je nach Anwendung und Betriebsweise kompensiert oder sogar überkompensiert werden.

Da der Taupunkt und die Kondensatmenge durch den Wassergehalt im Brennstoff erhöht werden, sind Gewebefilter nur bedingt geeignet zum Einsatz bei Holzfeuerungen, welche mit nassem Brennstoff betrieben werden. Aus diesem Grund wird für Gewebefilter meist der Einsatz von **trockenen Brennstoffen** empfohlen, obwohl die Auslegung bis zu Wassergehalten von 50% offeriert wird. In der Praxis ist davon auszugehen, dass die Freigabetemperatur bei nassen Brennstoffen aus Sicherheitsgründen meist deutlich über die angegebene Temperatur von 140° auf bis zu 180°C angehoben wird, was einen erheblichen Wirkungsgradverlust zur Folge hat. Da eine vermehrte Holznutzung in automatischen Holzfeuerungen jedoch zu einem grossen Teil mit Waldhackschnitzeln mit hohem Feuchtegehalt erfolgt, schränkt dies derzeit den Einsatzbereich von Gewebefiltern ein. Allerdings ist auch bei Elektroabscheidern bekannt, dass bei nassen Brennstoffen die Abgastemperaturen zum Beispiel auf 130°C anstelle des Auslegungswertes von 110°C angehoben wird. Wegen der erhöhten Problematik der Taupunktunterschreitung ist für Gewebefilter zudem in besonderem Mass auf einen möglichst stationären Betrieb der Feuerungsanlage mit langen Laufzeiten und wenig Anfahrzyklen zu achten. Bei Anwendungen mit nassem Brennstoff und häufigen Anfahrzyklen wird der Einsatz von Gewebefiltern deshalb nicht empfohlen.

Auf der durchströmten Filterschicht können teilweise auch gasförmige Schadstoffe wie SO<sub>2</sub>, HCl und allenfalls polychlorierte Dibenzo-*p*-Dioxine und Furane (PCDD/F) zu einem gewissen Teil abgeschieden werden. Weil Holzasche basisch ist, erfolgt insbesondere für saure Verbindungen wie HCl bereits ohne Sorptionsmittelzugabe eine gewisse Abscheidung. Für eine effiziente Abscheidung ist dagegen die Zugabe von Kalk erforderlich. Ebenso kann zur Abscheidung von PCDD/F zum Beispiel Herdofenkoks als Sorptionsmittel zugegeben werden. Ein sogenanntes Precoating des Filters wird zum Teil

auch zum Aufbau einer Filterschicht zur Vermeidung von Verklebungen in der Filterschicht vor Inbetriebnahme der Feuerung eingesetzt.

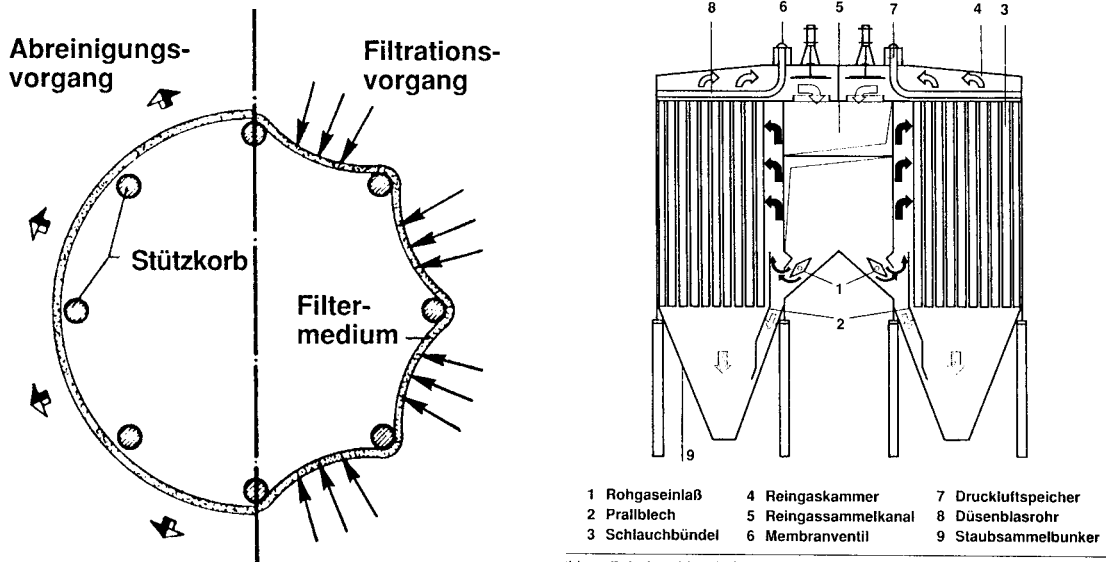


Bild 4.7 Funktion und Abreinigung eines Gewebefilterschlauchs (links) und Aufbau eines Gewebefilters mit zwei Kammern und hängenden Filterschläuchen (rechts) [Lurgj].

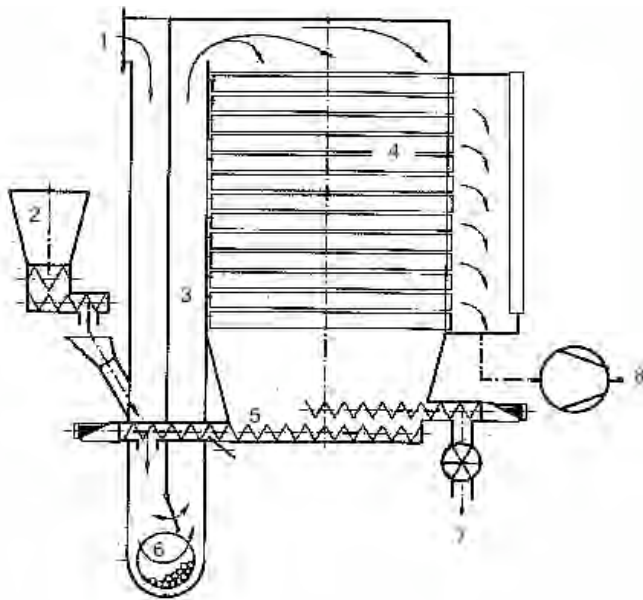


Bild 4.8 Gewebefilter mit liegenden Filterschläuchen, Sorptionsmittelzugabe in Kugelreaktor und Sorptionsmittelrückführung [Lühr].

## 4.4 Massnahmen zum Praxiseinsatz

Obwohl Elektroabscheider und Gewebefilter spezifische Vor- und Nachteile für den Einsatz bei automatischen Holzfeuerungen aufweisen, sind bei einer breiten Einführung dieser Techniken folgende Betriebseinflüsse bei der Anlagenkonzipierung zu optimieren und im Praxiseinsatz zu kontrollieren, welche im Grundsatz für beide Techniken gültig sind:

1. Weil ein Unterschreiten der Mindesttemperatur zur Freigabe der Feinstaubabscheider vor allem beim Anfahren und Abschalten sowie allenfalls bei Teillastbetrieb eintritt, ist für Anlagen mit Feinstaubabscheidern generell und für Gewebefilter im Besonderen ein möglichst **stationärer Betrieb** der Feuerungsanlagen anzustreben. Da dies bei reinem Heizbetrieb mit einer einzigen Feuerungsanlage nicht möglich ist, ist für mit Abscheidern ausgerüstete automatische Holzheizungen für reine Heizanwendungen eine geeignete Prozessintegration vorteilhaft. Dies kann zum Beispiel durch Einsatz eines Wärmespeichers zur Pufferung typischer Lastspitzen beim Einsatz in einem Schulhaus sowie durch Kombination mit einem zweiten Heizsystem für den Schwachlastbetrieb z.B. mit einem Gaskessel für erfolgen.
2. Da während einer Umgehung der Abscheider durch einen **Bypass** oder während **ausgeschalteter Hochspannung** in einem Elektroabscheider keine Abscheidung erfolgt, sind diese Betriebsarten im Betrieb auf ein Minimum zu beschränken. Wie weit diese Massnahmen beim Praxisbetrieb automatischer Holzfeuerungen zwingend erforderlich sind und wie weit sie heute zur Anwendung kommen, ist nicht sicher bekannt. Der Einfluss der Betriebsweise beider Abscheidertypen sollte bei einer breiten Einführung dieser Technik deshalb noch untersucht und abgeklärt werden. Zudem sollte mit entsprechenden Bestimmungen für die Betriebszulassung der maximale Anteil Betriebsstunden ohne Wirkung der Feinstaubabscheidung **limitiert** und durch Aufzeichnung einer geeigneten Grösse **überwacht** werden, um eine übermässige oder dauerhafte Umgehung der Abscheidung sicher auszuschliessen.
3. Während der **Abreinigung** kann bei beiden Systemen eine temporäre Erhöhung der Staubbelastung auftreten. Wenn während der Abnahmemessungen keine Abreinigung erfolgt, treten im Praxisbetrieb höhere Emissionen als durch die Abnahmemessung ausgewiesen auf. Um sicher zu stellen, dass auch während der Abreinigung kein unzulässiger Staubauswurf erfolgt, sollten die Anlagen entsprechend konzipiert und ausgerüstet werden. Im Weiteren ist bei breiter Einführung entsprechender Techniken darauf zu achten, dass entweder der Abreinigungsvorgang während der Abnahmemessung regulär erfasst wird oder die Grenzwerteinhalten inklusive Abreinigungszyklen durch andere Massnahmen **kontrolliert** und sicher gestellt werden kann.

Für beide Abreinigungssysteme ist zudem zu beachten, dass ein grundsätzlich sachgerechter Betrieb der Feuerungsanlage unter Verwendung eines für die Anlage geeigneten und zugelassenen Brennstoffs zu fordern ist. Zur Gewährleistung einer einwandfreien Feinstaubabscheidung ist insbesondere eine hohe Ausbrandqualität des abzuschheidenden Staubes zu gewährleisten. Als Garantiewert zum Betrieb der Elektroabscheider wird ein maximaler Anteil an Unverbranntem im Staub von 10 Gew.-% verlangt, während für Gewebefilter maximal 2 Gew.-% zulässig sind. Der für Elektroabscheider geforderte Wert kann unter normalen Betriebsbedingungen sicher erreicht werden und er sollte auch für

Anlagen ohne Feinstaubabscheider vorausgesetzt werden. Allerdings ist denkbar, dass unter ungünstigen Betriebsbedingungen höhere Anteile an Unverbranntem auftreten, wodurch die Gewährleistung der Abscheidung und der Betriebstauglichkeit entfallen kann. Entsprechend sind bei Elektroabscheidern Fälle aus der Praxis bekannt, in denen ein Brand der abgeschiedenen Stäube zu erheblichem Sachschaden geführt hat. Im Vergleich dazu ist der für Gewebefilter geforderte Garantiewert von 2 Gew.-% Unverbranntem, zumindest für kleinere automatische Holzfeuerungen als sehr streng einzustufen. Es ist davon auszugehen, dass dieser Wert heute nicht von allen Feuerungen unter Praxisbedingungen eingehalten werden kann. Dazu liegen bis anhin kaum Untersuchungen vor und es ist bei einer breiten Praxiseinführung zumindest mit einzelnen Problemfällen zu rechnen. Die wesentlich strengeren Anforderungen zum Einsatz von Gewebefiltern kann deren Einsatzmöglichkeiten einschränken oder allenfalls höhere Kosten zum Beispiel durch Einsatz besserer Feuerungs- und Regeltechniken verursachen, was im nachfolgenden Wirtschaftlichkeitsvergleich nicht berücksichtigt ist.

## **4.5 Erfahrungen von Anlagenbetreibern**

### **Anlage mit Elektroabscheider in Egnach**

Die Gemeinde Egnach betreibt eine 250 kW-Holzfeuerung mit Elektroabscheider von Aerob-Beth. Die Holzfeuerung wird nur im Winter betrieben, im Sommer kommt ein Gaskessel zum Einsatz. Die Anlage ist zudem mit einer Solaranlage ergänzt. Als Brennstoff kommt vorwiegend nasses Holz von Bachunterhalt zum Einsatz. Die Anlage läuft seit zwei Heizperioden einwandfrei und ohne Probleme sowie bis anhin ohne unerwartete Kosten oder Aufwendungen für den Unterhalt. Bei der Abnahmemessung werden Reingaswerte von 4 mg/m<sup>3</sup> bei 13 Vol.-% O<sub>2</sub> ausgewiesen.

### **Anlage mit Elektroabscheider in Bischofszell**

Der Verein Kompass betreibt eine 550 kW-Holzfeuerung mit Elektroabscheider von Aerob-Beth. Die Anlage funktioniert bis anhin einwandfrei und erreicht bei der Abnahme Reingaswerte von < 2 mg/m<sup>3</sup> bei 13 Vol.-% O<sub>2</sub>. Im Praxisbetrieb wird im Elektroabscheider eine vergleichbar grosse Aschemenge abgeschieden wie auf dem Rost.

### **Anlage mit Gewebefilter in Kreuzlingen**

Die Kantonsschule Kreuzlingen betreibt eine 350 kW-Holzfeuerung mit Gewebefilter von Scheuch, welches im Winter 2004 nachgerüstet wurde und unterdessen während zwei Wintern in Betrieb war. Die Heizzentrale ist bivalent mit Öl ausgeführt. Als Holzbrennstoff kommt ausschliesslich trockener Brennstoff zum Einsatz. Mit nassem und schlecht gelagertem Holz wurden bereits vor Einbau des Filters unbefriedigende Erfahrungen gemacht, weshalb seit Einbau des Filters nun bewusst darauf geachtet wird, dass nur trockenes Holz zum Einsatz kommt. Zudem wird die Holzfeuerung nur im Winter betrieben. In der ersten Heizperiode trat ein etwas erhöhter Betriebsaufwand auf, weil mehrfache Nachregulierungen der Feuerungsanlage und der der Abreinigung erforderlich waren. Während der zweiten Heizperiode hat die Anlage einwandfrei und ohne Störungen funktioniert. Bei der Abnahmemessung werden Reingaswerte von 1 mg/m<sup>3</sup> sowie von < 1 mg/m<sup>3</sup> bei 13 Vol.-% O<sub>2</sub> ausgewiesen.

# 5 Kosten und Wirtschaftlichkeit

## 5.1 Methode

Der Einsatz von Feinstaubabscheidern ist mit erheblichen Investitions- und Betriebskosten verbunden. Um die Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit zu beurteilen und einen neutralen Vergleich zwischen verschiedenen Abscheideverfahren zu ermöglichen, wird im Folgenden eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung anhand der **Annuitätenmethode** durchgeführt. Für Anlagen zur Wärmeerzeugung aus Holz werden daraus die spezifischen Wärmegestehungskosten bestimmt. Für die Wärmeerzeugung wird als Vergleichsszenario zudem die Wärmeerzeugung aus Heizöl bestimmt. Die Berechnungen werden für Anlagengrößen von 100 kW, 200 kW, 500 kW, 1 MW und 2 MW Nutzwärmeleistung durchgeführt.

Bei den ausgewiesenen Wärmegestehungskosten ist zu beachten, dass nur die **Wärmeerzeugung** bewertet ist, nicht jedoch die Wärmeverteilung. Ein Fernwärmenetz führt zu zusätzlichen Kosten von rund 2 bis 4 Rp./kWh franko Haus und zu weiteren Kosten für die Wärme-Übergabestation. Der in der Studie ausgewiesene Vergleich zwischen Wärme aus Holz mit Wärme aus einer Ölheizung ist deshalb nur bedingt praxisgerecht, weil die Alternative zu einem Fernwärmenetz mit Holz dezentrale Ölheizungen wären. Deren spezifische Kosten sind allerdings auch höher als die Kosten einer zentralen Ölheizung. Ein exakter Vergleich zwischen dezentralen Ölheizungen und Fernwärme aus Holz ist deshalb für einen konkreten Anwendungsfall spezifisch durchzuführen.

Datenbasis für die Wärmeerzeugung aus Holz und Heizöl bilden **Erhebungen** an rund 30 Praxisanlagen mit Holzheizung zwischen 2002 und 2005 [Good et al. 2005], Erfahrungen von der Planung und Auslegung von automatischen Holzheizwerken [Good et al. 2004] sowie Erhebungen und Offertanfragen zu Einzelkomponenten und Informationen von Lieferanten und von ausgeführten Anlagen [Verenum 1995 bis 2005, Jirkowsky et al. 2002, Meier et al. 2004, Nussbaumer et al. 2005]. Im Weiteren werden Wirtschaftlichkeitsdaten für Heizungen mit Heizöl eingesetzt, welche im Rahmen der erwähnten Erhebungen zu Vergleichszwecken bestimmt wurden und mittels Energiepreisen Stand Februar 2006 aktualisiert wurden.

## 5.2 Kostenangaben zur Wärmeerzeugung

- Für Holz und Heizöl werden als Referenzwerte die aktuellen und typischen Energiepreisen Stand Winter 2006 eingesetzt, nämlich Heizöl franko Tank zu 8 Rp./kWh (rund Fr. 80.– pro 100 Liter) und Waldhackschnitzel guter Qualität franko Silo zu 5 Rp./kWh. Energieholz ist teilweise auch günstiger verfügbar, insbesondere wenn Restholz in einem Holzverarbeitenden Betrieb zur Verfügung steht oder aus der Nachbarschaft bezogen werden kann.
- Als jährliche Vollbetriebsstundenzahl werden 2000 h/a angenommen. Mit dieser Annahme wird nicht berücksichtigt, dass für den Betrieb von Holzfeuerungen mit Staubabscheidern eine längere Laufzeit zum Beispiel durch Einsatz in einer bivalenten Heizanlage empfohlen wird, was zu einer längeren Betriebsdauer der dazu kleiner dimensionierten Holzfeuerung, aber gleichzeitig zu höheren Gesamtinvestitionskosten führen würde.
- Die Berechnung der spezifischen Kapitalkosten erfolgt mit einem Kalkulationszinssatz von 5,0 % pro Jahr.
- Für die Berechnungen werden eine Kalkulationsdauer von 15 Jahren für die Technik sowie von 30 Jahre für Gebäude und Land eingesetzt.
- Im betrachteten Leistungsbereich zur Wärmeerzeugung von 100 kW bis 2 MW kommen zwei Bauarten von Feuerungen zum Einsatz, nämlich Unterschubfeuerungen (Bild 5.1) und Vorschubrostfeuerungen (Bild 5.2). Letztere sind für Leistungen unter 500 kW teurer, d.h. die Investitionskosten sind mindestens 20% höher. Da die Feuerung jedoch nur rund 20% der Gesamtkosten verursacht, verursacht die Unterscheidung des Feuerungstyps weniger als 5% unterschiedliche Gesamtinvestitionskosten. Im Weiteren verursacht die teurere Feuerungsart im Gegenzug tiefere Personalkosten, so dass der Unterschied in der Gesamtbetrachtung noch geringer ausfällt. In der vorliegenden Studie wird deshalb für die Wärmeerzeugung keine Unterscheidung zwischen den zwei Feuerungstypen berücksichtigt.

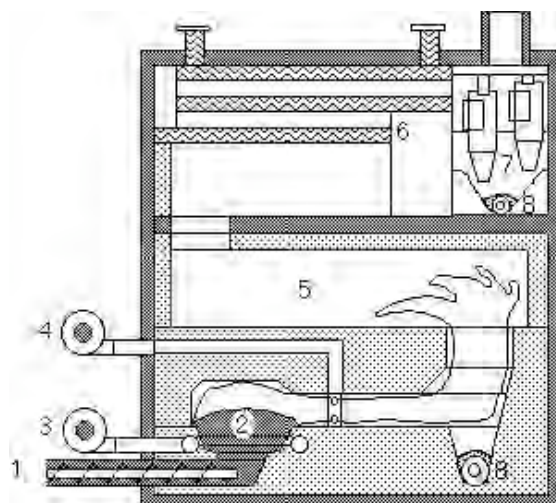


Bild 5.1 Unterschubfeuerung. 1 Brennstoffzuführung, 2 Verbrennungsretorte, 3 Primärluft, 4 Sekundärluft, 5 Brennchamber, 6 Wärmeübertrager, 7 Zyklon, 8 Ascheaustragung. Bild: Verenum.

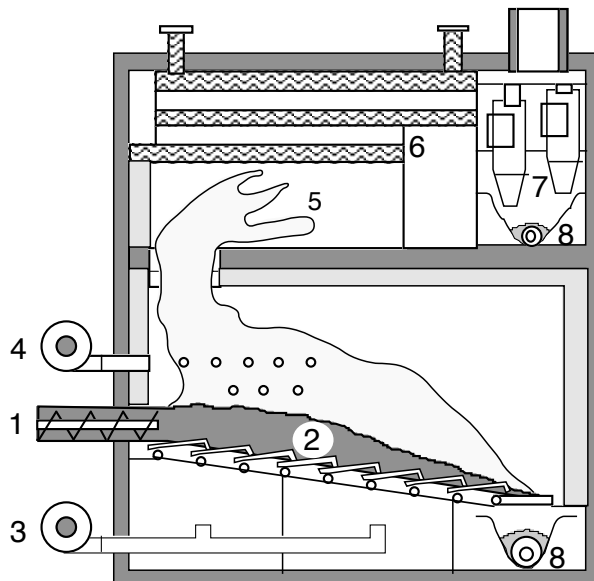


Bild 5.2 Vorschubrostfeuerung (Gegenstromprinzip).1 Brennstoffzuführung, 2 Rost, 3 Primärluft, 4 Sekundärluft, 5 Brennkammer, 6 Wärmeübertrager, 7 Zyklon, 8 Ascheausstragung. Bild: Verenum.

- Die Daten für Investitionskosten (Bild 5.3), Kapitalbedingungen, Brennstoffeigenschaften, Brennstoffkosten, Betriebsnebenkosten und Anlagenwirkungsgrad zur Wärmeerzeugung basieren auf Erhebungen an fünf- bis zehnjährigen Praxisanlagen, die im Zeitraum zwischen 2002 und 2005 untersucht wurden [Good et al. 2005].

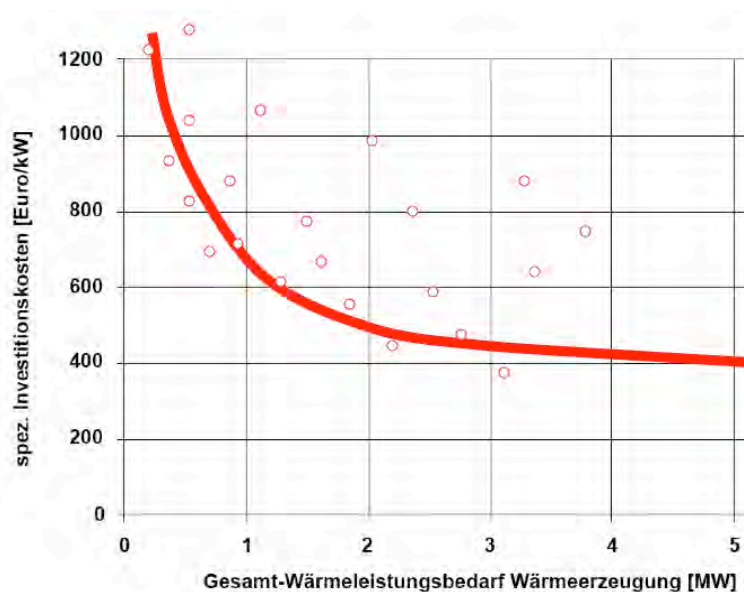


Bild 5.3 Spezifische Investitionskosten für Technik und Gebäude von Holzheizwerken ohne Fernwärmenetz bei Neubau auf erschlossenem Bauland in der Ebene in Funktion der Leistung. Berücksichtigt sind die gesamten Investitionskosten für Technik und Gebäude (Heizkessel, Heizraum, Kamin, hydraulische Einbindung, Steuerung und Brennstofflagerung mit Austragung). Die Linie zeigt die bei korrekter Planung und Ausführung erreichbaren Werte [Good et al. 2004], die Punkte illustrieren exemplarisch die typische Streubreite von während der letzten zehn Jahre realisierten Anlagen.

## 5.3 Kostenangaben für Feinstaubabscheider

Datenbasis für die Investitions- und Betriebskosten von Elektroabscheidern und Gewebefiltern bilden Offertanfragen bei folgenden fünf Anbietern in der Schweiz, in Deutschland und in Österreich. Insgesamt wurden folgende Offerten berücksichtigt:

Elektroabscheider:

- Aerob-Beth (Deutschland) für Platten-Elektroabscheider
- Scheuch (Österreich) für Platten-Elektroabscheider
- Ionitec (Österreich) für Platten-Elektroabscheider
- Trion (Schweiz) für Rohr-Elektroabscheider

Gewebefilter:

- Scheuch (Österreich) für Gewebefilter
- Eltecnica (Schweiz) für Gewebefilter von Lühr (Deutschland)

Um eine vergleichbare Datenbasis zu erhalten, wurde ein detailliertes Pflichtenheft zur Offerteinreichung erstellt und allen Anbietern zur Offerteinreichung zugestellt. Die Offertanfrage ist im Anhang abgedruckt. Insgesamt sind von fünf Anbietern vier Offerten für Elektroabscheider und zwei für Gewebefilter eingegangen, welche für die nachfolgenden Berechnungen verwendet werden.

Bei den Kosten für Elektroabscheider und Gewebefilter ist zu beachten, dass als Basis für die ausgewiesenen Berechnungen die Offerten von etablierten Herstellern verwendet wurden, was auch in etwa den drei im Kanton Thurgau beurteilten Referenzanlagen entspricht (Bild 5.4). Für Platten-Elektroabscheider wurden die Offerten von Aerob-Beth und Ionitec berücksichtigt, für Gewebefilter diejenige von Scheuch. Das Angebot von Eltecnica weist für Leistungen unter 1 MW deutlich höhere Investitionskosten aus, da für Leistungen unter 1 MW der gleiche Apparat wie für 1 MW offeriert wurde. Da die Anlagen von Scheuch als etabliert eingestuft werden, wurde das Angebot von Eltecnica für den betrachteten Leistungsbereich nicht berücksichtigt.

Das Angebot von Trion für ein Rohr-Elektrofilter weist für Leistungen bis 500 kW rund halb so hohe und damit vergleichbare Investitionskosten wie die berücksichtigte Variante des Gewebefilters aus, wird aber nicht als Standard berücksichtigt, da dazu keine Referenzanlagen vorliegen.

Das Angebot von Eltecnica für ein Gewebefilter von Lühr wird nicht berücksichtigt, weil die Kosten für die offerierte Kleinanlage rund doppelt so hoch sind wie von Scheuch.

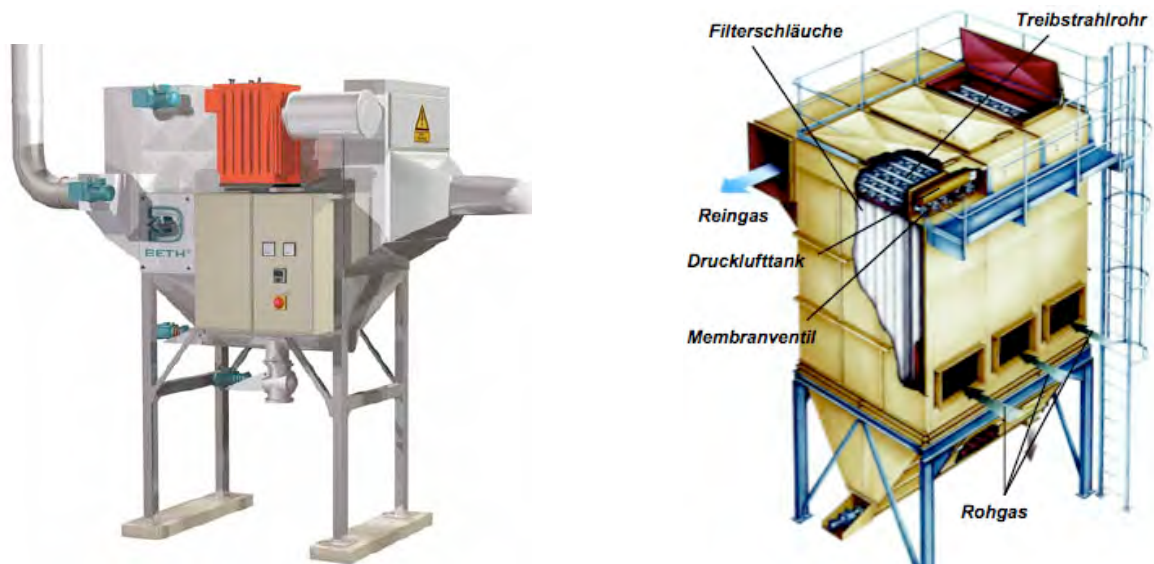


Bild 5.4 Beispiele der für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung berücksichtigten Abscheider: Elektroabscheider von Aerob-Beth (links) und Gewebefilter von Scheuch (rechts).

Für die Betriebskosten des Gewebefilters wurde eine Lebensdauer der Filterschläuche von 5 Jahren vorausgesetzt. Dies entspricht den Angaben des Herstellers. Da erst wenig Erfahrungen mit vergleichbaren Anlagen vorliegen, kann die Lebensdauer der Filterschläuche nicht mit Sicherheit abgeschätzt werden. Immerhin ist die Referenzanlage bereits zwei Jahre in Betrieb und zudem liegen von anderen Anlagen mehrjährige Betriebserfahrungen vor. Zumindest bei der Verwendung von trockenem Brennstoff und bei korrektem Betrieb der Anlage wird die angenommene Lebensdauer damit als realistisch bis pessimistisch eingestuft.

Die ausgewiesene Wirtschaftlichkeitsabschätzung ist damit konservativ und auf etablierten Techniken basierend. Für Elektroabscheider unter 500 kW sind die Investitionskosten auf der sicheren Seite und es 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 ist bei Gewebefiltern anzustreben, dass längere Lebensdauern erzielt und damit geringere Betriebskosten erreicht werden. Die effektiv erzielbaren Kosteneinsparungspotenziale werden in den kommenden Jahren beurteilt werden können, sofern beide Techniken auf breiter Basis zur Anwendung kommen.

## 5.4 Annahmen

Die nachfolgenden Annahmen zur Finanzierung (Tabelle 5.1) entsprechen der üblichen Praxis für grössere Heizzentralen und den Usancen des Bundes sowie langjährigen Erfahrungen. Die Betriebsdauer entspricht einer üblichen Heizanlage. Für die Brennstoffkosten sind typische Preise angenommen, die im Winter 2005/2006 im Mittelland franko Anlage verrechnet wurden, wobei für Energieholz Waldhackschnitzel guter Qualität angenommen wurden.

Die Annahmen zu den Investitionskosten sind in Tabelle 5.2 zusammengestellt. Die Investitionskosten gelten für den Fall eines Neubaus bei korrekter Planung der Anlage auf ebenem und erschlossenem Grundstück. Die Investitionskosten für Heizanlagen ohne Abscheider basieren auf den Angaben gemäss Kapitel 5.2. Die Investitionskosten für die Feinstaubabscheider basieren auf den Angaben der Offerten gemäss Kapitel 5.3 sowie auf Angaben zu ausgeführten Anlagen. Bei den Offerten wurden die in den offerierten Leistungen nicht enthaltenen Kosten für Planung und Peripherie-Aggregate abgeschätzt

Die Daten zu den Betriebskosten (Tabelle 5.3) basieren auf Erfahrungen sowie auf Angaben zum Energieverbrauch und den Kosten für Verbrauchsteile und Servicekosten gemäss Offerten. Im Berechnungsprogramm sind die spezifischen Betriebskosten zur einheitlichen Programmierart als Prozentsatz der Investitionskosten eingegeben, obwohl diese Zuordnung nicht generell gültig ist. Aus diesem Grund wurden die effektiven Betriebskosten verschiedener Anlagen bewertet und der Prozentsatz für die ausgewählten Referenzanlagen so gewählt, dass die Angaben für die ausgewerteten Beispiele den effektiven Kosten entsprechen. Die angegebenen Prozentsätze sind jedoch nicht auf andere Anlagen übertragbar, da zum Beispiel der Hilfsenergieverbrauch nicht von den Investitionskosten abhängig ist. Für genauere Abschätzungen müssen die Betriebskosten deshalb für jeden konkreten Fall separat bestimmt werden. Allerdings ist gerade die Abschätzung der Betriebskosten für die verschiedenen Feinstaubabscheider noch mit einer hohen Unsicherheit verbunden, da zum Beispiel die Lebensdauer der Filterschläuche für Gewebefilter nicht sicher bekannt ist und auch von Anlage zu Anlage stark variieren kann. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass die ausgewiesenen Standzeiten und Betriebskosten bei einer optimalen Abstimmung zwischen Feuerung und Abscheider sowie bei korrektem Betrieb der Anlage mit für die Anlage geeignetem Brennstoff eingehalten werden können. Sofern die Feuerungsanlage die Garantiewerte zum Beispiel in Bezug auf den Kohlenstoffgehalt der Flugasche nicht erreicht oder die Anlage unsachgemäss betrieben wird, können für den Betrieb der Feinstaubabscheidung jedoch erheblich höhere Kosten als ausgewiesen resultieren.

Tabelle 5.1 Annahmen für Finanzdaten, Betrieb und Brennstoff.

Bereich	Was	Einheit	Wert
<b>Finanzierung</b>	Kalkulationsdauer Technik	[a]	15
	Kalkulationsdauer Gebäude	[a]	30
	Kalkulationszinssatz	[%/a]	5.0
<b>Betrieb</b>	Vollbetriebsstunden pro Jahr	[h/a]	2000
<b>Brennstoff</b>	Brennstoffpreis Heizöl	[Rp./kWh <sub>end</sub> ]	8.0
	Brennstoffpreis Holz	[Rp./kWh <sub>end</sub> ]	5.0
	Heizwert Holz	[kWh <sub>end</sub> /kg TS]	5.0
	Aschegehalt Holz	[Gew.-% TS]	1.20%
	Entsorgungspreis Asche	[Fr./t]	200

Tabelle 5.2 Annahmen für Investitionskosten für Neubau auf erschlossenem Grundstück in der Ebene.

Technik Holz = Heizanlage ohne Feinstaubabscheider und ohne Silo

Gebäude Holz = Heizraum und Silo

Technik Heizöl = Heizanlage und Öltank

Gebäude Heizöl= Heizraum und Tankraum.

Brennstoff	Leistung	Einheit	Technik	Gebäude	Elektroabscheider	Gewebe-filter
<b>Holz</b>	100 kW	[Fr./kW <sub>Nutz</sub> ]	1495	805	1'025	700
	200 kW	[Fr./kW <sub>Nutz</sub> ]	1235	665	626	375
	500 kW	[Fr./kW <sub>Nutz</sub> ]	975	525	306	175
	1 MW	[Fr./kW <sub>Nutz</sub> ]	650	350	182	110
	2 MW	[Fr./kW <sub>Nutz</sub> ]	488	263	120	75
<b>Heizöl</b>	100 kW	[Fr./kW <sub>Nutz</sub> ]	750	250	0	0
	200 kW	[Fr./kW <sub>Nutz</sub> ]	550	180	0	0
	500 kW	[Fr./kW <sub>Nutz</sub> ]	375	125	0	0
	1 MW	[Fr./kW <sub>Nutz</sub> ]	300	100	0	0
	2 MW	[Fr./kW <sub>Nutz</sub> ]	225	75	0	0

Tabelle 5.3 Annahmen für weitere Daten. T = Technik, G = Gebäude. Variable Kosten gelten je 2000 h/a.

			Fix	Var.	Total
Betriebskosten	Holz	[% (T+G) / a]	1.50	1.25	2.75
	Heizöl	[% (T+G) / a]	0.50	0.50	1.0
	Elektroabscheider	[% Filter/a]	1.50	0.50	2.0
	Gewebe-filter	[% Filter/a]	4.50	1.50	6.0
Wirkungsgrad	Jahresnutzungsgrad Holz	Referenz	80		
	Jahresnutzungsgrad Heizöl	Referenz	85		
Kostenanteil	Wärme aus Holz	Gebäude	35		
	Wärme aus Heizöl	Gebäude	25		

## 5.5 Investitionskosten mit und ohne Abscheider

Bild 5.5 zeigt die Investitionskosten einer automatischen Holzheizanlage unterteilt nach:

- Technik (Heizanlage ohne Feinstaubabscheider)
- Gebäude (Heizraum und Silo)
- Feinstaubabscheider.

Im betrachteten Leistungsbereich weisen Elektroabscheider deutlich höhere Investitionskosten auf als das Gewebefilter. Auf Grund der Kurvenverläufe ist zudem erkennbar, dass beide Arten von Feinstaubabscheidern eine deutlich geringere Degression der spezifischen Investitionskosten aufweisen als die Kosten für die Heizanlage und das Gebäude, weshalb sich der Einsatz von Feinstaubabscheidern bei Kleinanlagen stärker auf die Gesamtkosten auswirkt als bei Grossanlagen.

Bild 5.6 zeigt dazu die spezifischen Investitionskosten einer automatischen Holzheizanlage ohne Feinstaubabscheider sowie mit Gewebefilter und Elektroabscheider.

Bild 5.7 zeigt die prozentuale Erhöhung der Investitionskosten einer automatischen Holzheizanlage durch Einsatz eines Elektroabscheiders oder eines Gewebefilters bezogen auf die Basiskosten für die Technik ohne Abscheider. Die Investitionskosten werden für eine 200 kW-Feuerungsanlage durch ein Gewebefilter um 24% und durch einen Elektroabscheider um 34% erhöht. Für eine 1 MW-Anlage beträgt die Kostenerhöhung rund 15% für ein Gewebefilter und 22% für einen Elektroabscheider.

Da das Gebäude mit Silo bei Holzheizwerken im Durchschnitt rund 35%, teilweise gar noch mehr der Gesamtkosten ausmacht, betragen die Kostenerhöhungen bezogen auf die Gesamtinvestition rund zwei Drittel der ausgewiesenen Werte, sofern das Gebäude in die Basiskosten einbezogen wird.

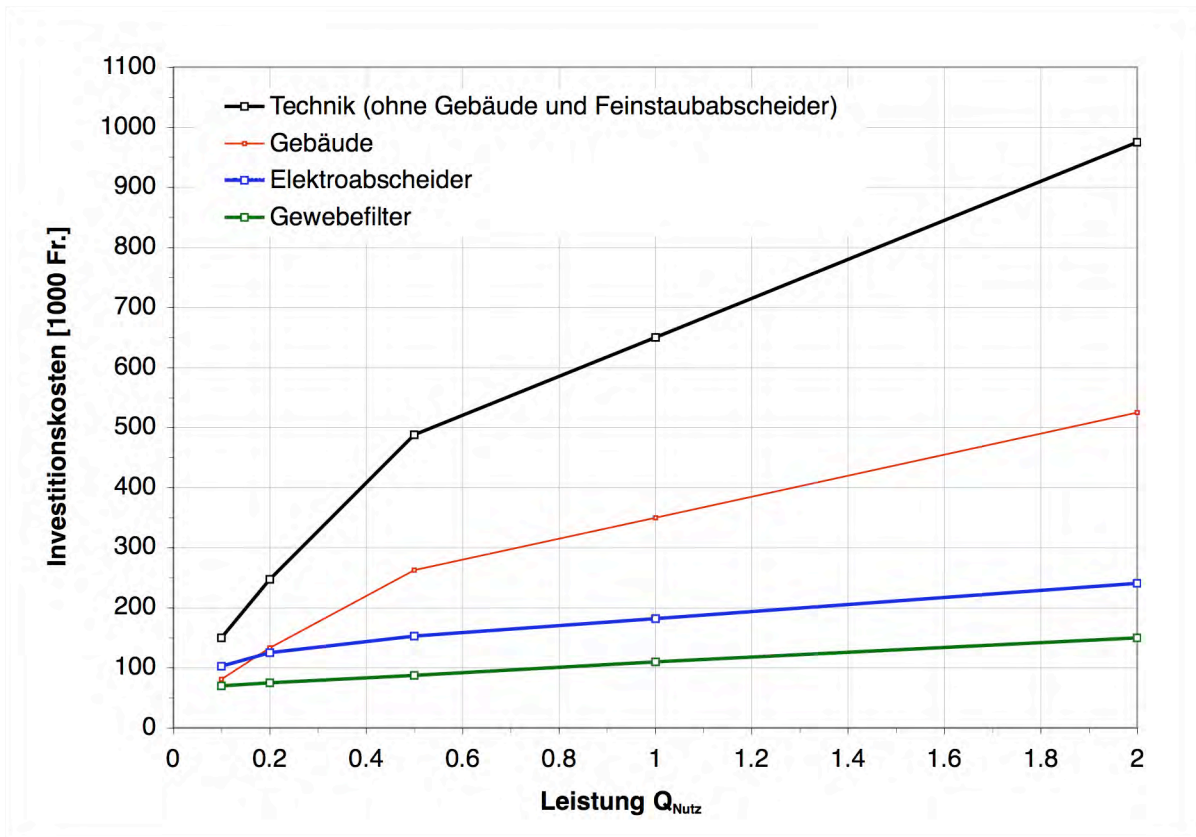


Bild 5.5 Investitionskosten Technik, Gebäude und Feinstaubabscheider für automatische Holzheizanlagen. Technik = Heizanlage ohne Silo und ohne Feinstaubabscheider, Gebäude = Heizraum und Silo. Lesebeispiel: Eine 1 MW-Anlage und ohne Feinstaubabscheider kostet inklusive Gebäude rund 1,0 Mio Franken. Mit Gewebefilter betragen die Gesamtkosten rund 1,1 Mio Franken, mit Elektroabscheider knapp 1,2 Mio Franken.

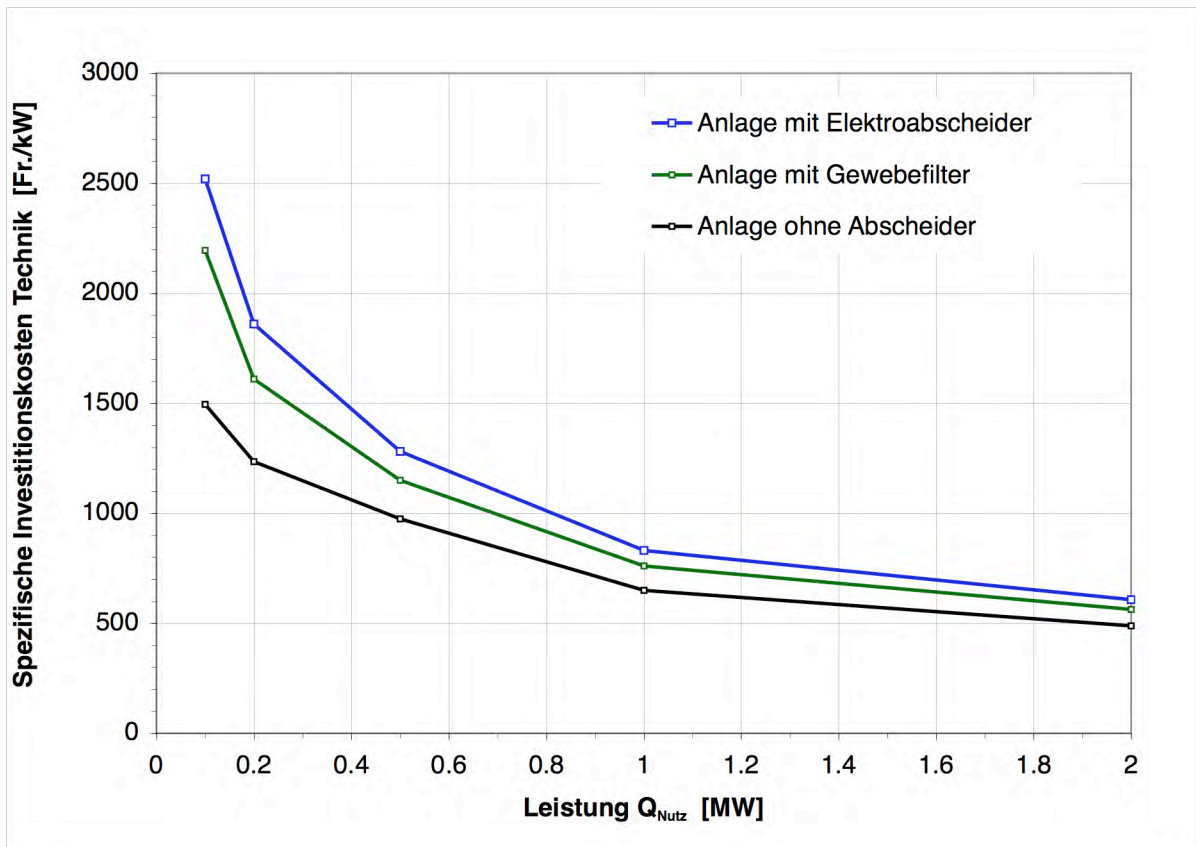


Bild 5.6 Spezifische Investitionskosten einer automatischen Holzheizanlage ohne Feinstaubabscheider sowie mit Gewebefilter oder Elektroabscheider (exklusive Gebäude und Silo).

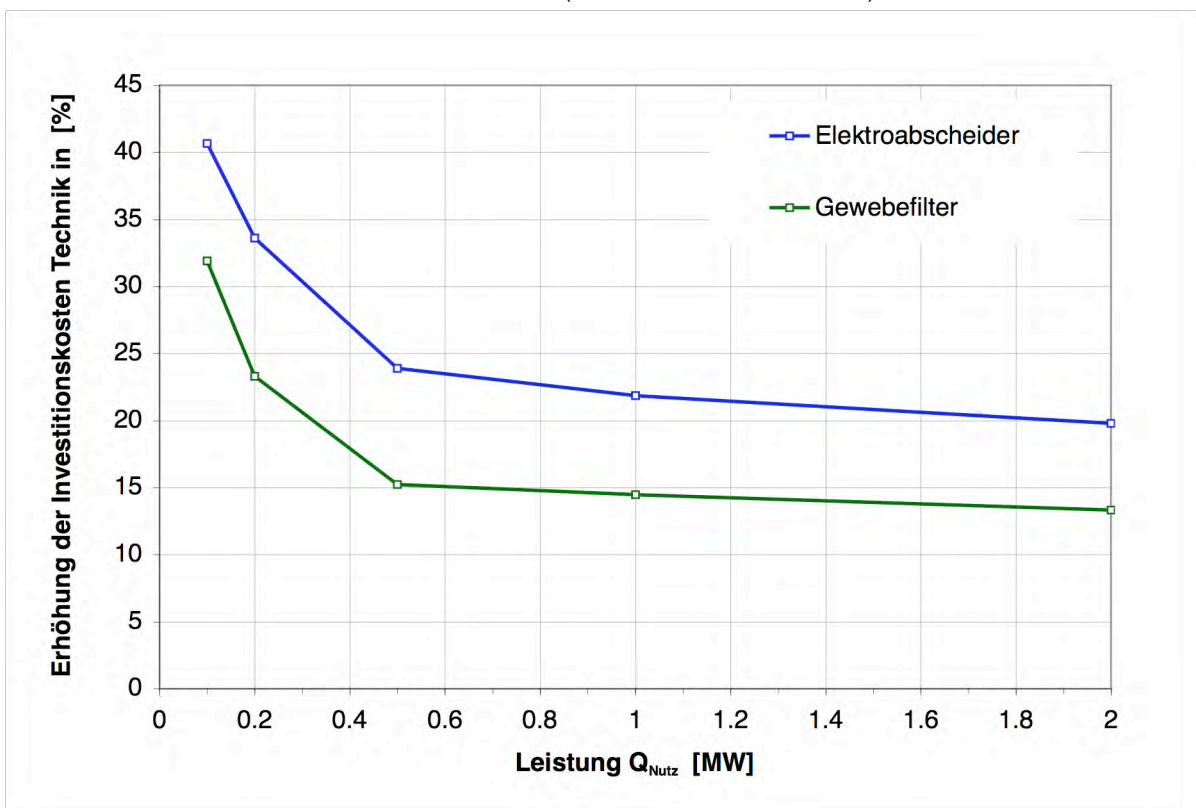


Bild 5.7 Prozentuale Erhöhung der Investitionskosten einer automatischen Holzheizanlage durch Einsatz eines Elektroabscheiders oder eines Gewebefilters in Prozent der Basiskosten für die Technik (Heizanlage exklusive Gebäude und Silo).

## 5.6 Wärmegestehungskosten mit und ohne Abscheider

Bild 5.8 zeigt die Wärmegestehungskosten einer Holzheizung im Vergleich zu einer Ölheizung, wobei für die Holzheizung die Fälle ohne Feinstaubabscheider, mit Elektroabscheider sowie mit Gewebefilter unterschieden sind. Die Wärmekosten gelten inklusive Gebäude, jedoch ohne Wärmeverteilung für ein allfälliges Wärmenetz. Im Weiteren sind ein für Heizanlagen typischer Betrieb mit 2000 Vollbetriebsstunden pro Jahr sowie ein Holzpreis von 5 Rp./kWh und ein Heizölpreis von 8 Rp./kWh angenommen. Unter den genannten Voraussetzungen ist Wärme aus einer automatischen Holzheizung ohne Feinstaubabscheider zwischen 100 kW und 500 kW rund 3 Rp./kWh teurer als Wärme aus Heizöl. Bei einer Leistung von 1 MW sinken die Mehrkosten auf rund 0,3 Rp./kWh, so dass Holz und Heizöl wirtschaftlich annähernd gleichwertig sind.

Bild 5.9 zeigt die Erhöhung der Wärmekosten einer automatischen Holzheizanlage durch den Einsatz eines Elektroabscheiders und eines Gewebefilters, wobei die Kapital- und Betriebskosten separat ausgewiesen sind. Der Elektroabscheider verursacht höhere Kapital- und geringere Betriebskosten als das Gewebefilter. Der Vergleich zwischen Elektroabscheider und Gewebefilter wird deshalb auch durch die Art der Finanzierung beeinflusst. Da die Kapitalkosten den Hauptanteil ausmachen, verursacht das Gewebefilter geringfügig tiefere Gesamtkosten. Da dabei nicht berücksichtigt ist, dass beim Gewebefilter grössere Einschränkungen bezüglich Brennstoffwassergehalt und Betriebsart der Anlage in Kauf zu nehmen sind, kann sich der Vorteil in der Praxis deshalb auch zu Gunsten des Elektroabscheiders verschieben.

Wie Bild 5.9 zeigt, verteuert die Feinstaubabscheidung die Wärme aus Holz für eine 200 kW-Heizanlage durch einen Elektroabscheider um rund 3,6 Rp./kWh. Gemäss Bild 5.10 entspricht dies einer Kostenerhöhung um rund 21%. Für eine Anlage mit 500 kW verursacht der Elektroabscheider Kosten von rund 1,8 Rp./kWh entsprechend einer Erhöhung um 12%. Für 1 MW Leistung sinken die Kosten auf rund 1 Rp./kWh entsprechend 8% Erhöhung.

Unter der Einschränkung, dass die Anlage für den Einsatz eines Gewebefilters geeignet ist, verursacht das Gewebefilter im gesamten Leistungsbereich rund 15% bis 20% geringere Gesamtkosten als ein Elektroabscheider. Auf Grund der Unsicherheiten der Betriebskostenabschätzung sowie der Einflüsse der Finanzierungsart wird die ausgewiesene Kostendifferenz zwischen Elektroabscheider und Gewebefilter allerdings als unsicher bewertet, so dass beide Abscheidertypen je nach Anwendungsfall wirtschaftlich vorteilhaft sein können.

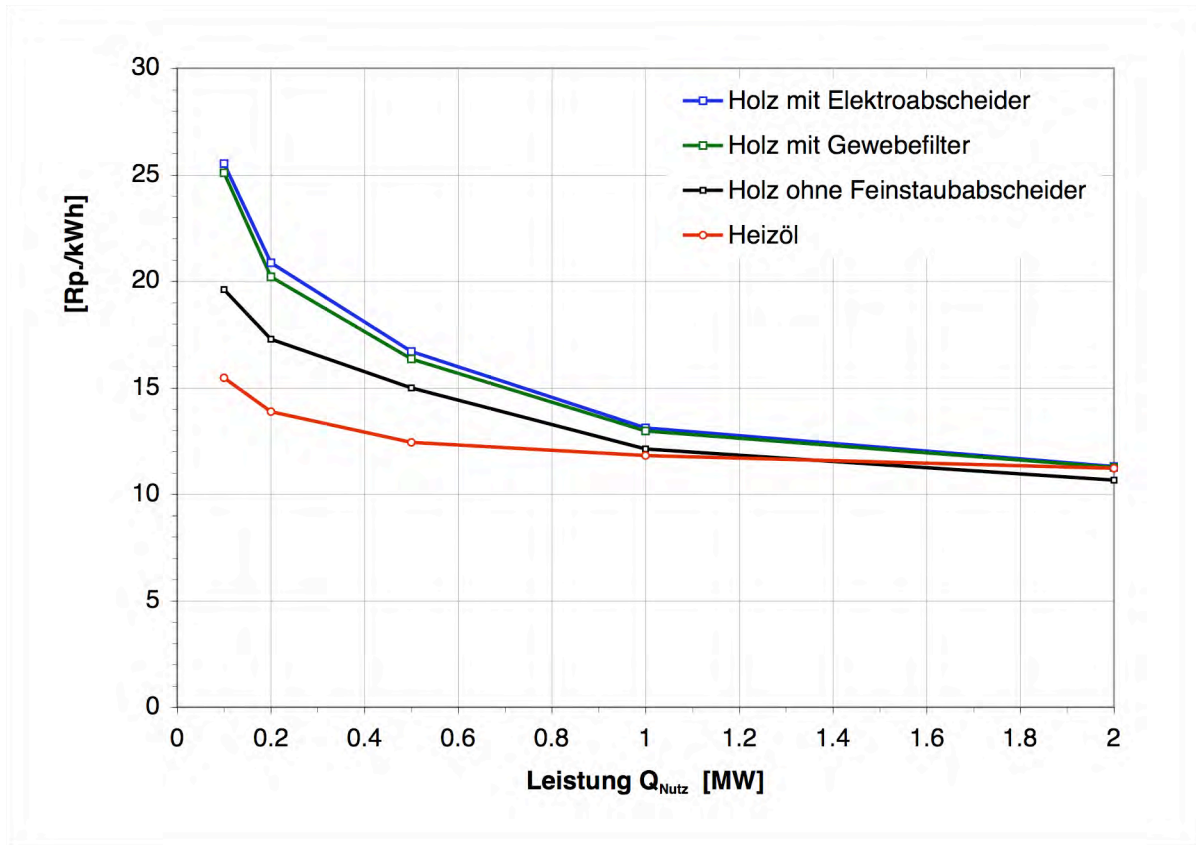


Bild 5.8 Wärmegestehungskosten mit Holz mit und ohne Feinstaubabscheider im Vergleich zu Heizöl (inklusive Gebäude, ohne Wärmeverteilung für allfälliges Wärmenetz) für 2000 Vollbetriebsstunden pro Jahr bei einem Holzpreis von 5 Rp./kWh und einem Heizölpreis von 8 Rp./kWh.

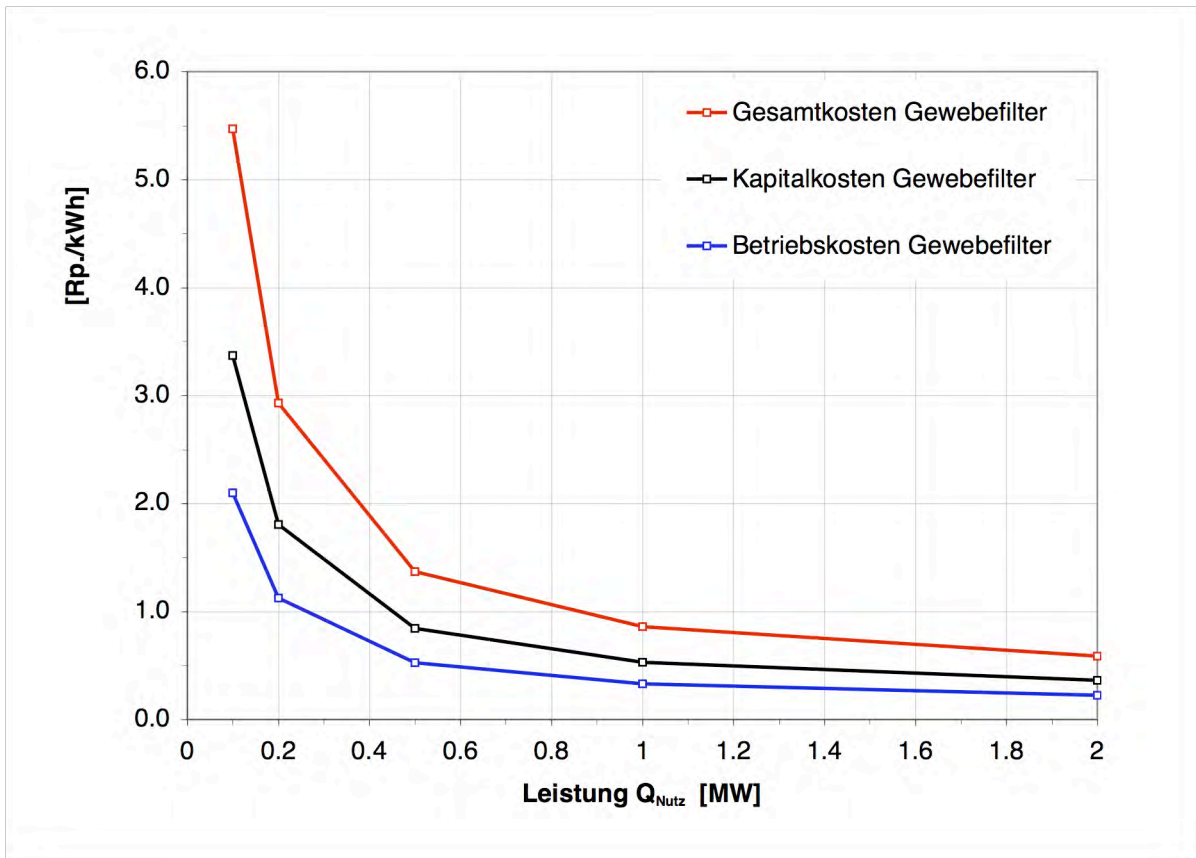
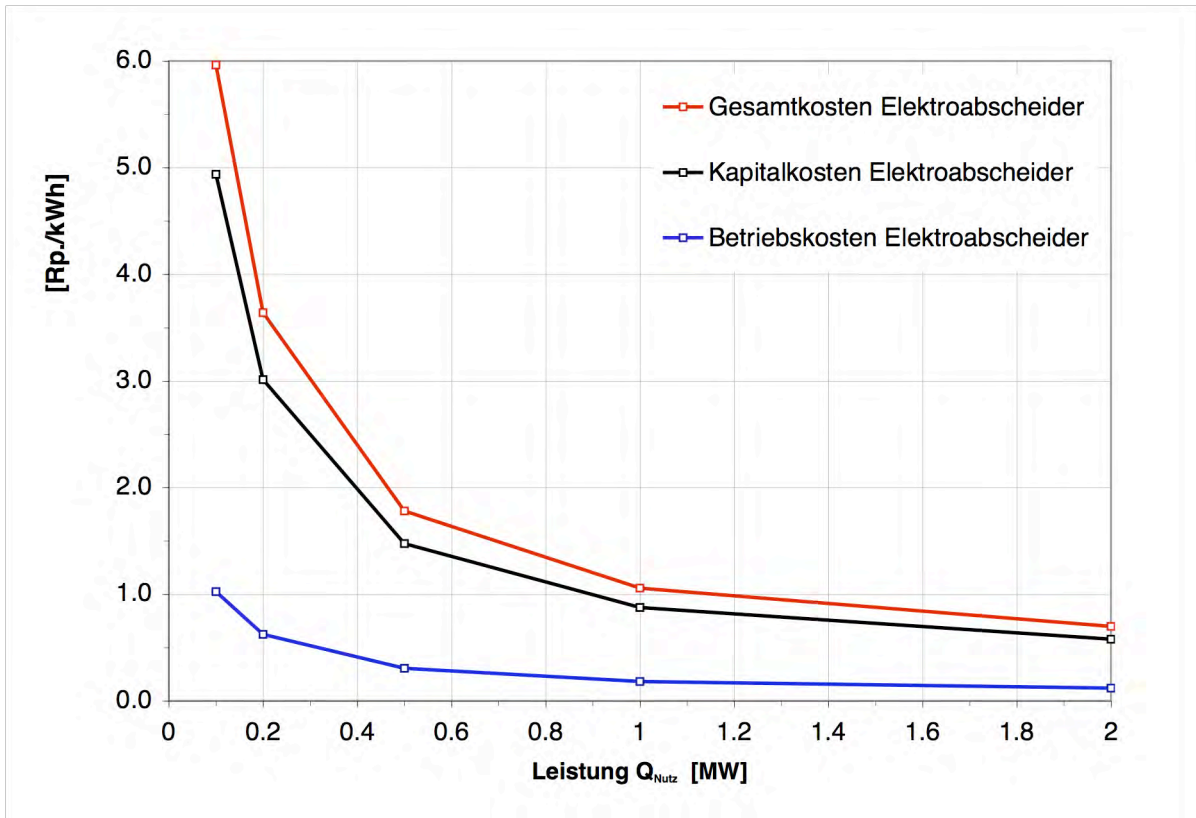


Bild 5.9 Erhöhung der Wärmegestehungskosten einer automatischen Holzheizung durch Einsatz eines Elektroabscheider (oben) und eines Gewebefilters (unten) mit Aufteilung der Kosten nach Kapital- und Betriebskosten.

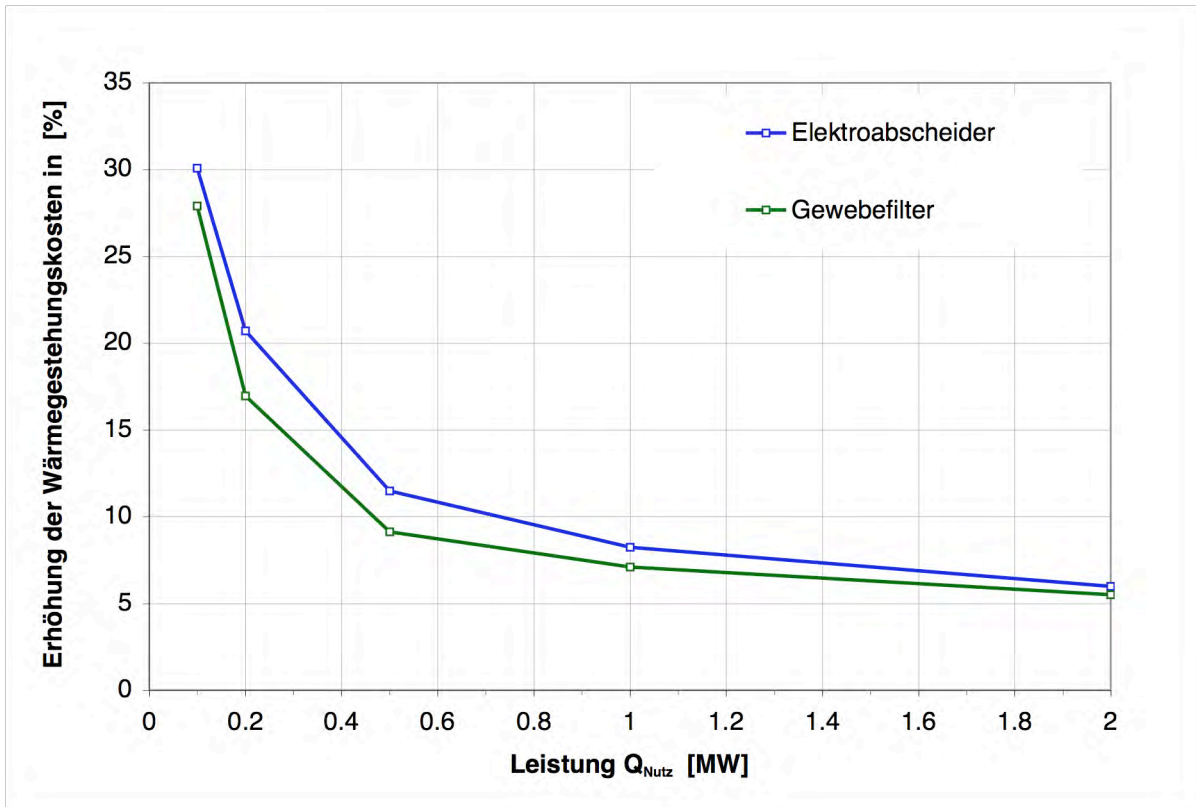


Bild 5.10 Prozentuale Erhöhung der Wärmegestehungskosten einer automatischen Holzheizung durch Einsatz eines Elektroabscheiders oder eines Gewebefilters.

## 6 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 als bewährter Stand der Technik verfügbar und zu beiden Anlagen existieren weitgehend positive Betriebserfahrungen von Referenzanlagen, wenn auch erst mit einzelnen Anlagen und erst über wenige Heizperioden, da Feinstaubabscheider für Holzfeuerungen in diesem Leistungsbereich bis anhin nicht erforderlich sind zur Einhaltung der Emissionsgrenzwerte.
- Beide Systeme weisen spezifische Vor- und Nachteile auf. So erzielen Gewebefilter bei regulärem und stationärem Betrieb eine sehr effiziente Staubabscheidung, welche Reingaswerte von in der Regel unter  $5 \text{ mg/m}^3$  (alle Angaben bis 1 MW bei 13 Vol.-%  $\text{O}_2$ , ab 1 MW bei 11 Vol.-%  $\text{O}_2$ ) sicher stellt. Demgegenüber kann zwar auch mit Elektroabscheidern eine hohe Abscheideleistung erreicht werden. Bis anhin wurden Elektroabscheider allerdings oft auf  $50 \text{ mg/m}^3$  Reingaswert ausgelegt, da eine noch höhere Abscheidung meist nicht verlangt wurde. Die in der vorliegenden Studie geforderte Abscheidung auf  $20 \text{ mg/m}^3$  kann jedoch auch mit Elektroabscheidern bei geeigneter Auslegung garantiert werden, bei guten Bedingungen werden zum Teil noch deutlich tiefere Werte erreicht. Um die Feinstaubemissionen möglichst effizient zu vermindern und gleichzeitig auch den Einsatz optimierter Elektroabscheider zu ermöglichen, wird deshalb ein Grenzwert von  $20 \text{ mg/m}^3$  vorgeschlagen. Bei deutlich höheren Emissionsgrenzwerten besteht die Gefahr, dass die Feuerungen ohne Abscheider ausgelegt und für die Abnahmemessung mit idealem Brennstoff und optimal einreguliert betrieben werden, während im Praxisbetrieb kaum eine Verbesserung im Vergleich zur heutigen Situation resultiert. Wenn dagegen ein deutlich strengerer Grenzwert von zum Beispiel  $5 \text{ mg/m}^3$  vorgegeben wird, besteht die Problematik, dass diese Werte bei üblicher Auslegung nur für Gewebefilter garantiert werden, welche jedoch nur bedingt geeignet sind beim Einsatz von nassen Brennstoffen.
- Bei Einführung eines Grenzwerts von  $20 \text{ mg/m}^3$  ist davon auszugehen, dass mit Feinstaubabscheidern ausgerüstete Anlagen bei regulärem Betrieb Reingasemissionen deutlich unter dem Grenzwert aufweisen werden. So weisen zwei Anlagen mit Leistungen bis zu 500 kW im Kanton Thurgau, welche mit Elektroabscheidern ausgerüstet sind, bei Abnahmemessungen Staubemissionen von  $4 \text{ mg/m}^3$  und  $< 2 \text{ mg/m}^3$  bei 13 Vol.-%  $\text{O}_2$  auf, während eine Anlage mit Gewebefilter Reingaswerte von  $1 \text{ mg/m}^3$  und  $< 1 \text{ mg/m}^3$  erzielt. Ein Grenzwert von  $5 \text{ mg/m}^3$  würde aber derzeit nur mit erheblichen Einschränkungen an Brennstoff und Betrieb gewährleistet und wird deshalb für diesen Leistungsbereich für Holzbrennstoffe als unverhältnismässig betrachtet.
- Beim heutigen Angebot auf dem Markt sind Gewebefilter für sehr kleine Leistungen von einem etablierten Hersteller wesentlich kostengünstiger erhältlich als Elektroabscheider von etablierten Anbietern. Demgegenüber verursachen Gewebefilter höhere Betriebskosten infolge des hohen Druckverlusts, des Bedarfs an Druckluft zur Abreinigung sowie infolge der beschränkten Lebensdauer der Filterschläuche. Für Leistungen bis 1 MW resultieren unter Annahme einer Kalkulationsdauer von 15 Jahren und einem Kalkulationszins von 5% p.a. für das Gewebefilter knapp 20% tiefere Gesamtkosten als für Elektroabscheider. Die Unterschiede sind allerdings gering und werden aufgrund der Unsicherheiten der Betriebskosten als nicht signifikant beurteilt. Gewebefilter sind im Betrieb 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 deutlich strengere Einschränkungen in Bezug auf die Ausbrandqualität der abzuscheidenden Stäube einzuhalten. Dies schränkt einerseits das Anwendungsgebiet ein und es relativiert auch den beschriebenen Kostenvorteil gegenüber Elektroabscheidern, da feuchtes Energieholz in der Regel kostengünstiger verfügbar ist als trockenes, was im Kostenvergleich nicht berücksichtigt ist. Aus diesem Grund ist davon auszugehen, dass je nach Anwendungszweck die Vorteile der Gewebefilter oder der Elektroabscheider überwiegen und somit für beide Verfahren sinnvolle Einsatzgebiete bestehen.

- Bei beiden Verfahren besteht die Gefahr, dass die mittleren Staubemissionen im Praxisbetrieb höher als während der Abnahmemessung sein können, wozu vor allem zwei Faktoren beitragen, nämlich einerseits unwirksame Betriebszustände der Abscheider und andererseits die periodische Abreinigung. Bei Gewebefiltern und auch beim offerierten Rohr-Elektroabscheider (welcher für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung nicht bewertet wurde, da es sich um eine Neuentwicklung handelt) können erhöhte Emissionen durch Betrieb der Feuerung mit Bypass-Umgehung des Abscheiders verursacht werden, bei Platten-Elektroabscheidern kann eine Abschaltung der Hochspannung bei Unterschreitung einer vorgegebenen Mindesttemperatur die Abscheidewirkung aufheben. Entsprechende Betriebszustände mit zu tiefen Abgastemperaturen treten vor allem beim Anfahren und bei Schwachlastbetrieb auf. Bei einer breiten Praxiseinführung von Feinstaubabscheidern bei Holzfeuerungen sollte deshalb darauf geachtet werden, dass der Einfluss der unwirksamen Zustände auf ein Minimum reduziert und im Betrieb geeignet überwacht wird, weil gerade beim Anfahrbetrieb besonders hohe Staubemissionen auftreten können. In Frage kommt zum Beispiel die Vorgabe einer Mindestverfügbarkeit des Abscheiders von zum Beispiel 95% oder mehr. Im Weiteren wird vorgeschlagen, zusammen mit einem Grenzwert gleichzeitig eine Vorschrift zur Limitierung der unwirksamen Betriebszustände einzuführen. Um sicher zu stellen, dass die periodische Abreinigung der Abscheider nicht zu einer unzulässigen Erhöhung der Gesamtemissionen führt, wird zudem vorgeschlagen, dass der Abreinigungszyklus während der Abnahmemessung erfasst und kontrolliert wird.
- Die Problematik der erhöhten Emissionen während der Abreinigung besteht zusätzlich auch bei automatischen Holzfeuerungen, welche mit einer periodisch betriebenen Kesselrohr-Abreinigung mit Druckluft ausgeführt werden, was seit einigen Jahren ab einer bestimmten Kesselgröße standardmässig erfolgt. Bis anhin wird die Kesselabreinigung während Abnahmemessungen in der Regel ausgeschaltet. Die Emissionsspitzen werden dadurch gerade nicht erfasst, weshalb für Abnahmemessungen in Zukunft auch die Kesselabreinigung berücksichtigt werden sollte, wobei dies für Anlagen mit und ohne Feinstaubabscheider gilt. Im Weiteren ist in der Praxis ein korrekter Betrieb der Feuerungsanlagen mit einem für die Feuerung zugelassenen Brennstoff Voraussetzung, dass die Feinstaubabscheidung einwandfrei funktioniert und die Gewährleistung nicht entfällt. Besonders zu beachten ist dabei die Forderung nach maximal 10 Gewichtsprozent Unverbranntem im Staub für Elektroabscheider und maximal 2 Gewichtsprozent für Gewebefilter. Besonders für Gewebefilter ist davon auszugehen, dass der geforderte Wert nicht von allen heutigen Anlagen und mit allen verfügbaren Energieholzsortimenten sicher gewährleistet werden kann.
- Mit den geschilderten Einschränkungen und Empfehlungen wird die Technik zur Feinstaubabscheidung bei automatischen Holzfeuerungen im Bereich ab rund 200 kW als für eine breite

Praxiseinführung verfügbar beurteilt, wobei sowohl für Elektroabscheider als auch für Gewebefilter etablierte Produkte auf dem Markt verfügbar sind und ein Staubgrenzwert von  $20 \text{ mg/m}^3$  bei 13 Vol.-%  $\text{O}_2$  garantiert und in der Praxis deutlich unterschritten werden kann. Selbst für Anlagen von 100 kW können entsprechende Abscheider eingesetzt werden. Allerdings sind die meisten angebotenen Feinstaubabscheider für Leistungen ab rund 300 kW bis 500 kW ausgelegt, weshalb der Einsatz der heute angebotenen Abscheider für Leistungen unter rund 200 kW bis 300 kW zumindest derzeit noch sehr teuer und aufwändig ist.

- Sofern nur Produkte etablierter Hersteller berücksichtigt werden, werden die Investitionskosten der Technik 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. Ein Elektroabscheider verursacht damit höhere Kapitalkosten als ein Gewebefilter. Ein Gewebefilter verursacht demgegenüber höhere Betriebskosten wegen des hohen Druckverlusts, des Druckluftverbrauchs und des Ersatzes der Filterschläuche vor Ablauf der Lebensdauer.
- Da die Kapitalkosten den Hauptteil der Gesamtkosten ausmachen, weist das Gewebefilter im Leistungsbereich unter 1 MW geringfügig tiefere Gesamtkosten auf als ein Elektroabscheider. In der Studie werden ein Kalkulationszinssatz von 5% p.a., eine Kalkulationszeit von 15 Jahren sowie Brennstoffpreise von 5 Rp./kWh für Energieholzschnitzel und 8 Rp./kWh für Heizöl angenommen. Für eine 200 kW-Heizanlage werden die Wärmegestehungskosten einer automatischen Holzheizung durch ein Gewebefilter um rund 3,0 Rp./kWh oder 17% erhöht, während sie durch einen Elektroabscheider um rund 3,6 Rp./kWh oder 21% erhöht werden. Die Wärme aus einer 200 kW-Ölheizung ist demgegenüber bereits im Vergleich zu einer Holzheizung ohne Feinstaubabscheider rund 3,4 Rp./kWh kostengünstiger als Wärme aus Holz. Die Feinstaubabscheidung führt somit zu rund einer Verdopplung der Mehrkosten im Vergleich zu Heizöl und verschlechtert die Konkurrenzfähigkeit damit erheblich. Der Wirtschaftlichkeitsvergleich gilt dabei nur für Einzelverbraucher mit der angegebenen Leistung, da im Fall eines Wärmenetzes noch die Kosten für die Wärmeverteilung zu berücksichtigen sind, während für dezentrale Ölheizungen höhere spezifische Kosten anfallen. Im Weiteren ist zu beachten, dass der angenommene Preis für Energieholz zumindest beim Eigenverbrauch von Restholz in Holzverarbeitenden Betrieben deutlich unterschritten wird und dass er auch für Waldhackschnitzel mit hohem Wassergehalt an der oberen Bandbreite angesetzt ist. Zudem unterliegt der Heizölpreis erheblichen Schwankungen, weshalb Wirtschaftlichkeitsvergleiche zwischen Holz und Heizöl generell eine erhebliche Unsicherheit aufweisen. Für Anlagen mit 500 kW erhöht ein Feinstaubabscheider die Wärmegestehungskosten um rund 1,3 bis 1,8 Rp./kWh oder um rund 9% bis 12%. Für Anlagen mit 1 MW verteuert ein Abscheider die Wärme um rund 1 Rp./kWh oder um rund 7% bis 8%.
- Die meisten von etablierten Herstellern auf dem Markt angebotenen Systeme sind für Leistungen ab 300 kW bis 500 kW konzipiert (Aerob-Beth, Eltecna/Lühr, Ionitec und Scheuch). Da für kleinere Leistungen zum Teil die gleichen Komponenten eingesetzt werden, verursachen sie beim Einsatz für Anlagen mit 200 kW relativ hohe spezifische Kosten. Für 100 kW Leistung wird die Kostenerhöhung noch deutlich akzentuiert. Die hohen Kosten für Kleinanlagen sind teilweise systembedingt, weil zum Beispiel für einen kleinen Elektroabscheider ein Hochspannungsaggregat mit identischer Leistung wie für grössere Apparate eingesetzt wird. Allerdings ist davon auszugehen, dass bei einer breiten Markteinführung von Feinstaubabscheidern in diesem Leistungsbereich

noch ein Kostenoptimierungspotenzial besteht, so dass bis in einigen Jahren auch von etablierten Herstellern zuverlässige Apparate zu tieferen Kosten verfügbar werden. Ein relevantes Kostenreduktionspotenzial wird vorab für Elektroabscheider erwartet. Bei Gewebefiltern heutiger Bauart ist dagegen das Potenzial zur Reduktion der Investitionskosten geringer. Dagegen ist denkbar, dass als Alternative zu heute üblichen Gewebefiltern unempfindlichere Metallgewebefilter entwickelt und im Markt eingeführt werden (z.B. [Winkel 2005]).

- Für Elektroabscheider bieten verschiedene Firmen zum Teil bereits heute kostengünstigere Lösungen für Kleinanlagen an. Insbesondere liegt eine Offerte für einen Rohr-Elektroabscheider vor, dessen Kosten für Leistungen zwischen 200 kW und 500 kW rund 50% der in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung angenommenen Kosten eines etablierten Herstellers betragen (Trion, basierend auf [Forsthuber 2006]). Von weiteren Kleinfirmen oder Forschungsinstituten sind zudem Entwicklungen für Elektroabscheider im Gang, welche dank Einsatz von einfacheren Standard-Hochspannungsgeräten noch einmal erhebliche Kosteneinsparungen versprechen [Beer 2006, Heidenreich 2006]. Daneben soll auch die erwähnte Technik der Metallgewebefilter erhebliche Kosteneinsparungen versprechen [Winkel 2006]. Die im vorliegenden Bericht ausgewiesenen Zusatzkosten für eine Feinstaubabscheidung sind damit auf der sicheren Seite und sie weisen in den kommenden Jahren noch ein Reduktionspotenzial auf. Gleichzeitig ist davon auszugehen, dass nicht alle Neuentwicklungen die Erwartungen bezüglich Kosten erreichen werden oder dass einfachere Systeme in Bezug auf Zuverlässigkeit oder Abscheidewirkung im Praxiseinsatz nicht den erwarteten Standard erzielen. Aus diesem Grund ist bei der Einführung neuer Techniken als Folge einer Grenzwertverschärfung durch entsprechende Kontrollen sicher zu stellen, dass die Anlagen nicht nur während der Inbetriebnahme und Abnahmemessung, sondern während der ganzen Betriebsdauer die geforderten Werte sicher einhalten.
- Entgegen der sehr positiven Erfahrungen mit den Anlagen unter 500 kW im Kanton Thurgau bestehen allerdings auch Hinweise von Anlagen mit Elektroabscheidern, welche im Praxisbetrieb nach der Inbetriebnahme teilweise viel höhere Emissionen (bis zu über 50 mg/m<sup>3</sup> bei 11 bzw. 13 Vol.-% O<sub>2</sub>) aufweisen und bei gewissen Brennstoffen oder Betriebszuständen nahezu wirkungslos sind. Systematische Untersuchungen und Erfahrungen dazu fehlen bis anhin jedoch, weshalb auch die Gründe für die teilweise unbefriedigenden Erfahrungen unklar sind. Grundsätzlich wird vermutet, dass nebst der Einstellung der Feinstaubabscheider vor allem auch die Feuerungsanlagen die garantierten Verbrennungsbedingungen nicht sicher einhalten oder in der Praxis nicht optimal betrieben werden und dass teilweise auch minderwertigere Brennstoffe als während der Abnahmemessungen eingesetzt werden. Dadurch können zum Beispiel kohlenstoffhaltige Partikel im Abgas enthalten sein, welche in Elektroabscheidern nur ungenügend abgeschieden werden oder in Gewebefiltern zu Schäden führen könnten. Im Weiteren ist auch die Emission gasförmiger Verbindungen möglich, welche erst im oder nach dem Abscheider als Kondensattröpfchen anfallen und die Partikelemissionen im Reingas unzulässig erhöhen. Obwohl somit der Einsatz von Feinstaubabscheidern für automatische Holzfeuerungen im Grundsatz unterstützt wird, besteht bei einer breiten Einführung entsprechender Techniken noch erheblicher Untersuchungs- und Optimierungsbedarf.
- Für Feinstaubabscheider kommt grundsätzlich sowohl eine Innen- als auch eine Aussenaufstellung in Frage. Um die Wärmeverluste und den Hilfsenergieverbrauch zu verringern, ist eine Innenaufstellung vorteilhaft und bei Neubauten bereits bei der Anlagen- und Gebäudeplanung zu

berücksichtigen. Im Vergleich zu einer Anlage ohne Feinstaubabscheider muss der Heizraum dazu um bis zu 50% vergrößert werden. Bei Kleinanlagen kann auch die erforderliche Bauhöhe von meist mehr als 3 Metern kritisch sein. Für Leistungen von 1 MW und mehr weisen Platten-Elektroabscheider einen deutlich größeren Platzbedarf als Gewebefilter auf, was bei knappen Raumverhältnissen die Verfahrensauswahl beeinflussen kann. Bei der vorliegenden Wirtschaftlichkeitsbetrachtung sind die Zusatzkosten für den größeren Heizraum nicht berücksichtigt, so dass die Kosten für die Feinstaubabscheidung geringfügig unterschätzt werden. Zumindest bei Neuanlagen im ländlichen Raum sind diese Zusatzkosten allerdings gering. Insbesondere bei Sanierungen steht der erforderliche Raum im Gebäude allerdings nicht immer zur Verfügung, so dass eine Aussenaufstellung gewählt werden muss oder erhebliche Zusatzkosten für Gebäudeanpassungen anfallen. Obwohl der Platzbedarf für die Feinstaubabscheidung somit berücksichtigt werden muss, ist zu beachten, dass bei automatischen Holzfeuerungen in der Regel das Brennstofflager den Grossteil der Gebäudekosten ausmacht und bei knappen Raumverhältnissen limitierend ist.

- Bei automatischen Holzheizanlagen ist generell zu beachten, dass für eine zuverlässige Funktion der Anlage mit hohem Wirkungsgrad und tiefen Emissionen ein geeignetes Zusammenspiel von Brennstoff, Feuerung und Anlagenbetrieb erforderlich ist. Es ist davon auszugehen, dass beim Einsatz eines Elektroabscheiders und noch verstärkt beim Einsatz eines Gewebefilters die Anforderungen an einen geeigneten Betrieb der Anlage noch erhöht werden und dass dem Zusammenspiel der Gesamtanlage als System noch verstärkte Bedeutung zukommt. Aufgrund von Praxiserfahrungen mit automatischen Holzheizwerken ist davon auszugehen, dass ein erheblicher Anteil der heutigen Heizanlagen die geforderten Bedingungen nicht immer oder nicht zuverlässig einhält. Bei einer breiten Einführung von Feinstaubabscheidern besteht somit die Gefahr, dass von Feuerungsherstellern und Anlagebetreibern davon ausgegangen wird, dass die Anforderungen an Feuerungstechnik, Regelung und Brennstoff durch Einsatz eines nachgeschalteten Feinstaubabscheiders nicht erhöht, sondern sogar verringert werden. So könnten Feuerungshersteller erwarten, dass heutige Anlagen die Anforderungen problemlos erreichen, während Anlagenbetreiber davon ausgehen würden, dass sie auch minderwertigere Brennstoffsortimente einsetzen könnten. Obwohl eine Erhöhung der Rohgasgehalte an für die Abscheidung unkritischen Feststoffen im Rohgas beim Einsatz eines nachgeschalteten Feinstaubabscheiders innerhalb gewisser Bandbreiten tatsächlich unkritisch ist, ist jedoch im Gegenteil davon auszugehen, dass die Anforderungen bezüglich Feuerungstechnik, Anlagenregelung und Anlagenbetrieb durch tiefere Staubgrenzwerte noch erhöht werden und folgende Konsequenzen haben könnten:
- Bezüglich Feuerungstechnik ist zu beachten, dass die Einhaltung der Garantiewerte an Unverbranntem im Rohgas für heutige Feuerungsanlagen zumindest nicht bei allen Betriebszuständen und mit allen vorgesehenen Brennstoffen unproblematisch ist.
- Bezüglich Regelung ist zu beachten, dass die Forderung nach einer Mindestverfügbarkeit der Feinstaubabscheidung den Anteil an Stillstands- und Anfahrphasen limitieren und wesentlich strengere Betriebsanforderungen als heute zur Folge haben kann.
- Bezüglich Brennstoff und Verbrennungsbedingungen ist zu beachten, dass auch gasförmige Verbindungen durch Kondensation nach der Feinstaubabscheidung zu einer unzulässigen Feinstaubbelastung führen können. Da unverbrannte gasförmige Kohlenwasserstoffe und auch andere kondensierbare Verbindungen durch die Feinstaubabscheidung nicht oder nur teilweise abgeschieden werden, sind deren Konzentrationen durch vollständige Verbrennung, Vermeidung der

Ausgangsstoffe im Brennstoff oder allenfalls durch zusätzliche Massnahmen wie zum Beispiel einer sorptiven Abscheidung zu reduzieren. Bei bisherigen Anlagen treten entsprechende gasförmige Schadstoffe zum Teil nicht in Erscheinung oder sie führen meist nicht zu einer Überschreitung der bisherigen Staubgrenzwerte. Verschärfte Staubgrenzwerte können deshalb auch zu deutlich erhöhten Anforderungen bezüglich Ausbrandqualität führen und/oder Einschränkungen bezüglich Brennstoffzusammensetzung zur Folge haben. Da dazu bis anhin jedoch kaum Erfahrungen vorliegen, werden parallel zur Einführung entsprechender Grenzwerte und Technologien systematische Abklärungen zu dieser Fragestellung empfohlen.

- Durch den Einsatz von Feinstaubabscheidern bei automatischen Holzfeuerungen können die Staubemissionen aus dieser Anlagenkategorie signifikant reduziert. Allerdings ist zu beachten, dass handbeschickte Holzfeuerungen wahrscheinlich eine grösseren Fracht an Feinstaub verursachen als automatische Holzheizungen. Entsprechende Abschätzungen sind mit grosser Unsicherheit verbunden, da der Staubauswurf von handbeschickten Holzfeuerungen durch die Betriebsart drastisch beeinflusst werden kann. So können die Emissionen teilweise um bis mehr als einen Faktor 100 variieren im Vergleich zwischen dem Idealbetrieb und einem sehr schlechten Betrieb [Klippel et al. 2006]. Gleichzeitig ist zu beachten, dass Feinstaub aus schlecht betriebenen Holzfeuerungen eine mehrfach höhere Toxizität aufweist als Feinstaub aus automatischen Holzfeuerungen. Aus diesen Gründen sind wirksame Massnahmen zur Reduktion der Feinstaubfracht und insbesondere zur sicheren Vermeidung von Partikelemissionen aus unvollständiger Verbrennung bei handbeschickten Holzfeuerungen dringend notwendig. Derzeit bestehen Anstrengungen zur Entwicklung und Praxiseinführung von kostengünstigen Elektroabscheidern für Holzfeuerungen mit Leistungen unter 100 kW bis hin zu Einzelfeuerstätten [Berntsen 2006, Rüegg 2006]. Der Aufbau entsprechender Abscheider ist teilweise wesentlich einfacher, da insbesondere auf eine automatische Abreinigung verzichtet wird. Allerdings sind auch die Abscheidegrade zum Teil deutlich tiefer als bei den im Leistungsbereich über 100 kW betrachteten Anlagen. Obwohl auch Feinstaubabscheider für Kleinfeuerungen grundsätzlich sinnvoll sein können, wird als prioritär eingestuft, vorab den Stand der Technik von handbeschickten Holzfeuerungen so zu verbessern, dass eine annähernd vollständige Verbrennung mit tiefen Emissionen an unvollständig ausgebrannten Feinstäuben möglich ist. Dabei ist insbesondere auch darauf zu achten, dass die Emissionen während des Kaltstarts möglichst tief sind und in ein Messverfahren zur Zulassungsprüfung entsprechender Feuerungen einbezogen wird. Schliesslich ist durch einen konsequenten Vollzug sicher zu stellen, dass Kleinfeuerungen in der Praxis sachgerecht betrieben werden und insbesondere nicht zur Verbrennung unzulässiger Brennstoffe und von Abfall missbraucht werden [Zürcher 2006].

# 7 Anhang

## 7.1 Angefragte Informationen für Offertanfrage

1. Anlagenbeschrieb und Funktionsprinzip
2. Ist ein Vorabscheider in Form eines Multizyklons notwendig oder empfohlen?  
Ist ein Betrieb ohne Multizyklon möglich und empfohlen?  
Je nach Eignung können Variante 1 oder 2 oder allenfalls beide offeriert werden.
3. Apparatedimensionen und Aufstellungsmöglichkeiten
4. Investitionskosten für
  - Feinstaubabscheider
  - Komponenten zur Einbindung in Feuerungssystem, optional inkl. Ventilator
  - Lieferung innerhalb der Schweiz
  - Montage und Inbetriebnahme
5. Druckverlust bei minimalem und maximalem Betriebsvolumenstrom
6. Hilfsenergieverbrauch bei min. und max. Betriebsvolumenstrom (Ventilator, Begleitheizung usw.)
7. Bedarf und Verbrauch an Hilfsstoffen oder Anlagekomponenten (z.B. Druckluft, falls erforderlich)
8. Service- und Unterhaltsbedarf und -kosten
9. Betriebsverhalten und Abscheideleistung beim Anfahren und Abstellen der Feuerungsanlage:
  - Sind eine Begleitheizung und/oder ein Bypass-Betrieb vorgesehen
  - Falls ja, Bedingungen für Begleitheizung bzw. Bypass
10. Eignung sowie allfällige Einschränkungen oder Mehrkosten zur Nachrüstung bestehender Anlagen
11. Referenzanlagen, soweit vorhanden mit Abnahmemessungen
12. Optionale Informationen, soweit verfügbar
  - Abscheideleistung in Funktion der Korngrösse und weiterer Staubeigenschaften
  - Allfällige Einschränkungen bezüglich Staub oder Betrieb (z.B. Temperatur, Schwachlast usw.)
  - Erwarteter Reingaswert für den beschriebenen Staub
  - Optionen und Wirkung zur Abscheidung weiterer Schadstoffe wie z.B. HCl und PCDD/F
  - Vor- und Nachteile des von Ihnen angebotenen Systems im Vergleich zu anderen Techniken insbesondere für Gewebefilter im Vergleich zu Elektroabscheider und umgekehrt.

## 7.2 Pflichtenheft für Offertanfrage

**Staubgehalt im Reingas (Garantiewert)**

**20 mg/m<sup>3</sup> @ 13% O<sub>2</sub>**

### Brennstoff und Feuerungsanlage

Holzbrennstoffe nach Luftreinhalte-Verordnung (LRV)

Anhang 5 Ziffer 3, Absatz 1, Buchstabe b und c:

b. naturbelassenes nicht stückiges Holz wie Hackschnitzel, Späne, Rinde etc.

c. Restholz aus der Holzverarbeitenden Industrie und dem Holzverarbeitenden

Gewerbe sowie von Baustellen, soweit das Holz nicht druckimprägniert ist

und keine Beschichtungen aus halogenorganischen Verbindungen wie PVC enthält.

Wassergehalt im Brennstoff	10	bis 50 Gew.-%
O <sub>2</sub> -Gehalt im Rohgas	5	bis 15 Vol.-%
Taupunkt	45	bis 60 °C
CO-Gehalt im Rohgas	< 1000 mg/m <sup>3</sup> @ 13% O <sub>2</sub>	
C <sub>org</sub> im Staub	< 5 Gew.-%	

Betriebsbereich zur Berechnung des Abgasvolumenstroms (Hilfsgrößen)

Luftüberschuss Lambda	< 2	
Lastbereich der Feuerung	30	bis 100 %

### Rohgaszusammensetzung

	Min	Max
<b>Var. 1 Staubgehalt (ohne Vorabscheider)</b>		<b>1000 mg/m<sup>3</sup> @ 13% O<sub>2</sub></b>
<b>Var. 2 Staubgehalt (mit Zyklon als Vorabscheider)</b>		<b>250 mg/m<sup>3</sup> @ 13% O<sub>2</sub></b>
Korngrößenverteilung		
< 0.5 µm	25	200 mg/m <sup>3</sup> @ 13% O <sub>2</sub>
0.5 – 2.5 µm	10	100 mg/m <sup>3</sup> @ 13% O <sub>2</sub>
2.5 – 10 µm	0	50 mg/m <sup>3</sup> @ 13% O <sub>2</sub>
> 10 µm	0	50 mg/m <sup>3</sup> @ 13% O <sub>2</sub>
Sauerstoffgehalt	5	20 Vol.-%
Wasserdampfgehalt	5	20 Vol.-%
<b>Betriebstemperatur T<sub>B</sub> bei stationärem Betrieb*</b>	<b>100</b>	<b>250 °C</b>
<small>*falls enger, in Offerte angeben</small>		
<b>Betriebstemperatur T<sub>B</sub> während Anfahren*</b>	<b>20</b>	<b>250 °C</b>
<small>*falls unzulässig in Offerte Massnahme zum Anfahren angeben</small>		

**Volumenstrom** angegeben in Betriebs-m<sup>3</sup> des feuchten Abgases bei Betriebstemperatur

Feuerungsleistung	Betriebsvolumenstrom feucht bei T <sub>B</sub>	
	Min m <sub>3</sub> /h	Max m <sub>3</sub> /h
100 kW	100	500
200 kW	200	1 000
500 kW	500	2 500
1000 kW	1 000	5 000
2000 kW	2 000	10 000

## 7.3 Liste der angefragten Firmen

AEROB-BETH Filtration GmbH

Borsigstr 8

D – 23560 Lübeck

Eltecnica AG Industrieanlagen

Rautistrasse 60, Postfach

CH – 8048 Zürich

Ionitec Abgasreinigung GmbH

Franz-Sauer-Str. 42

A – 5020 Salzburg

Scheuch GmbH

Weierfing 68

A – 4971 Aurolzmünster

TRION Luftfiltersysteme GmbH

Unterwerkstrasse 4

CH – 4132 Muttenz

## 8 Literatur

- Beer, S.: Entwicklung und Test einer Elektrofilteranlage für kleine Biomasseheizkessel, *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
- Berntsen, M.: Small scale electrostatic precipitator for residential wood combustion, 9. Holzenergie-Symposium, 20. Oktober 2006, ETH Zürich, 2006, ISBN 3-908705-11-8
- Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, BUWAL-Bericht 355, Bern 2004
- 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
- Fritz, W.; Kern, H.: *Reinigung von Abgasen*, Vogel, 2. Auflage, Würzburg 1990, ISBN 3-8023-0244-3
- Good, J. et al.: *Planungshandbuch, Schriftenreihe QM Holzheizwerke, Band 4*, C.A.R.M.E.N. e.V. Straubing, Bezugsquelle Holzenergie Schweiz, 2004
- Good, J.; Nussbaumer, Th.; Jenni, A.; Bühler, R.: *Systemoptimierung automatischer Holzheizungen*, Bundesamt für Energie, Schlussbericht Projekt 44278, Bern 2005
- 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
- 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 sowie im Tagungsband nicht veröffentlichte mündliche Angaben zu den Kosten von Elektro- und Gewebefiltern ab 200 kW
- Jirkowsky, C.: Wärmerückgewinnungs-Verfahren bieten auch wirtschaftliche Vorteile, *Holz-Zentralblatt* 130. Jg., Nr. 76 (2004), 1036
- Klippel, N., Kasper, M., Bengtsson, K.: Gas turbines – sources or sinks for ambient air aerosols? 6<sup>th</sup> *ETH Conference on Nanoparticle-Measurement*, ETH Zürich 2002
- Klippel, N.; Nussbaumer, T.; Hess, A.: Particle emissions from residential wood combustion – Design and operation conditions determine health impacts, 10<sup>th</sup> *ETH Conference on Combustion Generated Particles*, ETH Zürich, 21.–23. August 2006 (in Vorbereitung)
- Klippel, N.; Nussbaumer, T.: Feinstaubbildung in Holzfeuerungen und Gesundheitsrelevanz von Holzstaub im Vergleich zu Dieselmotoren, 9. Holzenergie-Symposium, 20. Oktober 2006, ETH Zürich, 2006, ISBN 3-908705-11-8
- Lurgi: *Firmenunterlagen Abgasreinigung*, Frankfurt 1991
- Meier, D.; Good, J.; Nussbaumer, Th.; Thier, A.; Kunz, H.: Wirtschaftlichkeitsvergleich Fernwärme und Ölheizung, 8. *Holzenergie-Symposium*, Bundesamt für Energie, Bern 2004, ISBN 3-908705-10-X, 195–208
- Nussbaumer, T.; Klippel, N.; Oser, M.: Health relevance of aerosols from biomass combustion in comparison to Diesel soot indicated by the cytotoxicity on lung cells, *Aerosols in Biomass Combustion*, Series Thermal Biomass Utilization, Graz University of Technology, Vol. 6, ISBN 3-9501980-2-4, 45–54
- Nussbaumer, T.; Meier, D.; Good, J.: Wirtschaftliche Gleichwertigkeit von Fernwärme und Öl, *Planer & Installateur*, 4 (2005), 26–28

- Nussbaumer, T.; Hasler, P.: Bildung und Eigenschaften von Aerosolen aus Holzfeuerungen, *Holz als Roh-und Werkstoff* 57, 1999, 13–22
- Oser, M., Nussbaumer, T., Schweizer, B., Mohr, M., Figi, R. (2000). Tagungsband 6. Holzenergie-Symposium, Bundesamt für Energie, Bern 2000, 51–68
- Oser, M.; Nussbaumer, Th., Schweizer, B.; Mohr, M.; Figi, R.: Influences on aerosol formation in an automatic wood furnace. *Aerosols from Biomass Combustion*, International Seminar, Verenum, Zurich 2001, ISBN 3-908705-00-2, 59–64
- Oser, M.; Nussbaumer, Th.; Müller, P.; Mohr, M.; Figi, R.: Aerosolbildung bei der Holzverbrennung und Beeinflussung der Staubemissionen durch gestufte Verbrennung, *7. Holzenergie-Symposium*, 18. Oktober 2002, Zürich, ISBN 3-908705-01-0, 35–52
- Rüegg, P.: Klein-Elektroabscheider für Holzfeuerungen: Stand der Entwicklung und Praxiserfahrungen, *9. Holzenergie-Symposium*, 20. Oktober 2006, ETH Zürich, 2006, ISBN 3-908705-11-8
- Schatloch, V.: 4<sup>th</sup> ETH Conference on Nanoparticle Measurement, ETH Zürich, 2000
- Verenum: *Offertanfragen für Heizanlagen zwischen 200 kW und 5 MW sowie für Wärmekraftkopplungsanlagen zwischen 0,5 MWe und 10 MWe aus CH, D und A*, interne Informationen, Zürich zwischen 1995 und 2005
- 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
- Winkel, O.: Der praxisingerechte Filter für Rauchgase aus kleinen und mittleren Biomasse-Verbrennungen, *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
- Winkel, O.: Entwicklung und Einsatz eines Metallgewebe-Rauchgasfilters, ALS-Jahresbericht 2005 – 5. Holzfeuerungs-Kolloquiums, Arbeitsgruppe Luftreinhaltung der Universität Stuttgart, ISBN-Nr.: 3-928123-54-8, 43–61
- Zürcher, F.: FairFeuern – Aktionsplan zur Verhinderung erhöhter Emissionen und illegaler Abfallverbrennung, *9. Holzenergie-Symposium*, 20. Oktober 2006, ETH Zürich, 2006, ISBN 3-908705-11-8