



**Baudirektion  
Kanton Zürich**

**AWEL Amt für  
Abfall, Wasser, Energie und Luft**  

---

**Abteilung Lufthygiene**

## **PM10-Feinstaubminderung bei automatischen Holz- und Biomassefeuerungen**

# **Bericht zum Stand der Technik**

### **Kurzfassung**

---

**ecocast**

***Abfallenergie-/Umwelttechnik***

St. Annastrasse 53  
CH-6006 Luzern

**Herausgeber:** Baudirektion Kanton Zürich  
**AWEL** Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft  
Abteilung Lufthygiene  
CH-8090 Zürich

**Verfasser:** **ecocast**  
Abfallenergie-/Umwelttechnik  
St. Annastrasse 53  
CH-6006 Luzern

**Autoren:** Dr. Stefan Egli  
Beat Huber

**Bezugsquelle:** Baudirektion Kanton Zürich  
AWEL, Abt. Lufthygiene  
[www.luft.zh.ch](http://www.luft.zh.ch)

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>Seite</b>
Zusammenfassung.....	1
1. Einleitung .....	3
2. Aufgabenstellung.....	4
3. Ist-Zustand Emissionsverhalten automatischer Holzfeuerungen .....	5
3.1 Ist-Zustand automatische Feuerungen .....	5
3.2 Brennstoff.....	6
3.3 Betrieb und Regelung der Feuerungsanlagen .....	6
3.4 Ist-Zustand Rauchgasreinigung .....	8
4. Ist-Zustand Staubminderung bei automatischen Holzfeuerungen .....	10
4.1 Einleitung .....	10
4.2 Zusammenfassung Stand der Technik der Entstaubung bei automatischen Holzfeuerungen .....	13
4.3.1 Gefahren durch brennbare Stäube und Filtermedien .....	14
4.3.2 Schutzmassnahmen .....	14
5. Zusatzkosten durch die Nachrüstung bestehender Holzfeuerungen mit Entstaubungsanlagen .....	16
6. Schlussfolgerungen .....	19

## **Anhang**

Fließbild Holzfeuerung mit Gewebefilter

## **Zusammenfassung**

In der Schweiz liegt die Belastung von Feinstaub (PM10) in weiten Teilen über den in der Luftreinhalte-Verordnung seit 1. März 1998 enthaltenen Immissionsgrenzwerten. Feuerungen tragen gemäss Erhebungen im Kanton Zürich ca. 3% zur PM10-Belastung bei. Bei den Feuerungen wiederum tragen die Holzfeuerungen überdurchschnittlich zu den Feinstaubemissionen bei. An Holzfeuerungen unterschiedlicher Grösse durchgeführte Untersuchungen in der Schweiz und im Ausland haben gezeigt, dass der grösste Teil der bei der Verbrennung freigesetzten Staubteilchen Durchmesser  $< 10 \mu\text{m}$  aufweist. Die gesundheitsschädigende Wirkung dieser Feinstäube ist mittlerweile nachgewiesen.

Zur Umsetzung der festgelegten lufthygienischen Ziele, hat der Kanton Zürich sein Luftprogramm im Juni 2002 ergänzt. Bei den Holzfeuerungen sollen die Feststoffemissionen ab einem Massenstrom von 150 g Feststoffe/h auf  $10 \text{ mg/m}^3$  beschränkt werden. Dieser Grenzwert greift somit ab einer Feuerungsgrösse von ca. 500 kW Feuerungswärmeleistung. Zu dieser Massnahme wird nun bei den betroffenen Kreisen eine Vernehmlassung durchgeführt.

Das AWEL, Abteilung Lufthygiene, hat die Firma ecocast beauftragt, den Stand der Technik der Feinstaubminderung bei automatischen Holz- und Biomassefeuerungen zu ermitteln. Die Abklärungen zeigen, dass eine über den Multizyklon hinausgehende Entstaubung bei Feuerungen im Bereich von 0.5 –1 MW noch nicht Stand der Technik ist. Die auf dem Markt derzeit verfügbaren Systeme sind das Gewebefilter und der Elektrofilter. Beide Systeme sind eigentlich technisch sehr ausgereift. Im Zusammenhang mit der Anwendung bei Holzfeuerungen ergeben sich aber doch einige spezifische Probleme. Beim Gewebefilter liegen diese beim Anfahrvorgang (Gefahr der Kondensation und damit der Filterverblockung, Brandgefahr) und beim Elektrofilter ist es die eher schlechte Abscheidewirkung kleiner, einfeldriger Filter, wie sie bei Holzfeuerungen aus wirtschaftlichen Gründen in der Regel eingesetzt werden.

Bezüglich Abscheideverhalten im Feinstaubbereich, weist der Gewebefilter gegenüber dem Elektrofilter klare Vorteile auf. Er stellt auch bei Feuerungen im Bereich zwischen 0.5 und 1.0 MW Leistung die kostengünstigere Lösung dar. Bei grösseren Feuerungen werden die Kostenvorteile des Gewebefilters immer kleiner.

Bei einer Festlegung des Grenzwertes auf  $10 \text{ mg/m}^3$ , können Elektrofilter bei kleineren Feuerungen aufgrund der notwendigen Niederschlagsfläche und der dadurch hohen Kosten kaum eingesetzt werden. Inwieweit durch eine Senkung der Kosten für das Hochspannungsaggregat der Elektrofilter wieder konkurrenzfähig werden kann, ist derzeit schwer abschätzbar.

Verbreitet ist der Gewebefilter bei der Verbrennung belasteter Hölzer. Dort erlaubt er auch durch Zudosierung von Additiven (Kalk, Kalk-Herdofenkoks-Gemische) die Abscheidung von gasförmigen Schadstoffen aus dem Rauchgas.

Bei der Prüfung vorhandener Unterlagen und Messergebnisse musste festgestellt werden, dass kaum verlässliche Messergebnisse zur Feinstaubbelastung bei grösseren Holzfeuerungen mit Entstaubungseinrichtungen vorhanden sind. Keine Ergebnisse liegen zum Verhalten der Entstaubungsanlagen beim Anfahren und im Teillastbereich vor.

Es wird daher empfohlen, das Abscheideverhalten von automatischen Holzfeuerungen mit Entstaubung im realen Anlagenbetrieb zu untersuchen. Abschätzungen zeigen, dass beim Gewebefilter die an sich sehr gute Abscheidewirkung durch häufigen Bypassbetrieb deutlich verschlechtert wird.

Die Untersuchungen könnten die Grundlage für einen Leitfaden zur praktischen Umsetzung der verschärften Staubgrenzwerte bilden.

## 1. Einleitung

Neuere Untersuchungen zum Emissionsverhalten von Holzfeuerungen haben gezeigt, dass die bei der Verbrennung freigesetzten Staubteilchen mehrheitlich Durchmesser  $< 10 \mu\text{m}$  aufweisen. Sie werden als **Feinstaub** bezeichnet und mit Bezug auf den sog. aerodynamischen Durchmesser auch in die Klassen PM 10<sup>1</sup>, PM 2.5 und PM 1 eingeteilt. Solche Staubteilchen sind so klein, dass sie am Kehlkopf vorbei bis in tiefere Lungenabschnitte vordringen und so die Atemwege beeinträchtigen und chronische Bronchitis fördern können. Ihr Anteil an in der Umgebungsluft enthaltenen Gesamtschwebestaub beträgt ca. 55 %.

Der in diesem Zusammenhang ebenfalls oft verwendete Begriff **Aerosole** umfasst Partikel und Tropfen im Grössenbereich zwischen 0.001 und 100  $\mu\text{m}$ .

In der Schweizerischen Luftreinhalte-Verordnung sind Emissionsgrenzwerte für Schwebestaub (PM10), Blei im Schwebestaub, Cadmium im Schwebestaub und für den Staubbiederschlag insgesamt festgelegt. Für den Mittelungszeitraum von einem Jahr liegt der Schwebestaub-Immissionsgrenzwert bei 20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

In der Europäischen Gemeinschaft ist in der Richtlinie 1999/30/EG eine stufenweise Verschärfung der Immissionsgrenzwerte für PM10 vorgesehen.

Aerosole können bei Holzfeuerungen sowohl bei unvollständiger Verbrennung (Russ, PAH, unverbrannter Kohlenstoff und unverbrannte Holzbestandteile) als auch bei vollständiger Verbrennung (Aschepartikel, Schadstoffe) entstehen.

Holzverbrennungsanlagen sind bei den Feuerungen eine massgebliche Emissionsquelle. Insgesamt tragen Holzfeuerungen in der Schweiz ca. 4 % zu den Feinstaubemissionen bei.

Unter anderem hat die Feinstaubproblematik in Deutschland zu einer Novellierung der TA-Luft geführt. Die neue Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft ist am 1. Oktober 2002 in Kraft getreten. Da der TA-Luft in Europa eine Art Vorreiterrolle zukommt, ist die Novellierung dieser Technischen Anleitung auch für die Schweiz von Bedeutung.

Die neue TA-Luft legt Holzfeuerungen beim Gesamtstaub die folgenden Begrenzungen fest:

- bei Feuerungen mit einer Feuerungswärmeleistung von 5 MW oder mehr 20  $\text{mg}/\text{m}^3$
- bei Feuerungen mit einer Feuerungswärmeleistung von weniger als 5 MW 50  $\text{mg}/\text{m}^3$
- bei Anlagen mit einer Feuerungswärmeleistung von weniger als 2,5 MW, 100  $\text{mg}/\text{m}^3$   
die ausschliesslich naturbelassenes Holz einsetzen

In der Schweiz sehen die Massnahmenpläne zur Verbesserung der Luftqualität ebenfalls Verschärfungen der Emissionsgrenzwerte für Staub vor.

Der vorliegende Bericht liefert Grundlagendaten zur technischen und wirtschaftlichen Machbarkeit verschärfter Emissionsgrenzwerte für Staub bei automatischen Holzfeuerungen.

---

<sup>1</sup> Definiert als feindisperse Schwebestoffe mit einem aerodynamischen Durchmesser von  $\leq 10 \mu\text{m}$  und einem Abscheidegrad von 50 % im Probenahmesystem.

## **2. Aufgabenstellung**

Der vorliegende Bericht soll aufzeigen, mit welchen technischen Massnahmen die verschärften Grenzwerte für die Staub- und Feinstaubemissionen bei automatischen Holz- und Biomassefeuerungen erfüllt werden können. Im Rahmen der ergänzenden Emissionsbegrenzungen für solche Anlagen mit Feuerungsleistungen ab ca. 500 kW im Kanton Zürich, sollen geeignete technische Konzepte und Anlagen evaluiert werden, welche die Feinstaubemissionen PM10 sowohl bei bestehenden als auch bei neuen Anlagen erheblich reduzieren können. Aus Gründen der Walderhaltung, Energie- und Klimapolitik soll jedoch mit dem Einsatz von innovativen Filtertechnologien aus der Sicht der Luftreinhaltung die aktive Förderung der Holzfeuerung nicht behindert, bzw. verunmöglicht werden.

Für die politischen Grundlagen zur Anpassung der Staubemissionsbegrenzungen soll mit diesen Massnahmen darauf hingezielt werden, dass mittelfristig hauptsächlich mittlere bis grössere Anlagen mit weitergehender Filtertechnik bewilligt, bzw. gefördert werden können.

Im Entwurf zur Massnahmenplanänderung sind die ergänzenden Emissionsbegrenzungen für Holzfeuerungen bei den Feststoffemissionen soweit festgelegt, dass ab einem Massenstrom von 150 g Feststoffen pro Stunde, die Feststoffemissionen  $10 \text{ mg/m}^3$  nicht überschritten werden dürfen.

Aus der Vielzahl der Staubabscheidungstechnologien ist eine Auswahl zur Einhaltung der verschärften Emissionsgrenzwerte geeigneter Systeme zu treffen.

Zur Klärung der wirtschaftlichen und technischen Machbarkeit der geplanten behördlichen Auflagen, sind in der vorliegenden Arbeit die folgenden Kriterien untersucht worden:

- Stand der Technik der automatischen Holzfeuerungen;
- Brennstoff Holz und Biomasse;
- Ermittlung Stand der Technik der Rauchgasreinigung bei Holzfeuerungen mit Feuerungsleistungen  $> 500 \text{ kW}$ ;
- Zu erfassender Feuerungsleistungsbereich für die Umsetzung der verschärften Auflagen bezogen auf den Kanton Zürich;
- Technische und wirtschaftliche Machbarkeit bei Neuanlagen und Nachrüstungen;
- Notwendiger Raumbedarf;
- Sicherheit und Verfügbarkeit;
- Betrieb und Unterhalt;
- Reststoffentsorgung;
- Behördliche Kontrollmöglichkeiten und amtliche Abnahmemessung;

Die erarbeiteten Grundlagen sollen das Verständnis der Rauchgasreinigungstechnik im Zusammenhang mit der automatischen Holz- und Biomassefeuerungsanlage vertiefen und als Basis für technische Ansätze zur Staub-/ und Feinstaubminderung dienen.

### **3. Ist-Zustand Emissionsverhalten automatischer Holzfeuerungen**

Im Hinblick auf den aktuellen Handlungsbedarf im Bereich der Luftreinhaltung stehen die Feinstaubemissionen PM10 im Vordergrund. Holzfeuerungen im Allgemeinen lassen sich zukünftig mit gutem Gewissen nur noch dann als ausreichend umweltverträglich bezeichnen, wenn auch die Feinstaubemissionen vermindert werden können. Beim Vergleich der gesamten Umweltauswirkungen tragen vor allem die Partikel- und die Stickoxidemissionen zum Schädigungspotential der Holzfeuerungen bei.

#### **3.1 Ist-Zustand automatische Feuerungen**

Holzfeuerungen werden in einem breiten Leistungsbereich angeboten. Der in den letzten Jahren und speziell mit dem Lotharprogramm angestiegene Holzenergieeinsatz wird in allen Bereichen der öffentlichen und privaten Bauten, in der Landwirtschaft, in Gewerbe- und Industrie und speziell in der Holzverarbeitenden Industrie für den Eigengebrauch und im Wärmeverbund mit verschiedensten Feuerungssystemen betrieben.

Rund 50% aller automatischen Holz- und Biomassefeuerungen für naturbelassene Holzbrennstoffe aus dem Wald sowie Restholz aus der Holzindustrie, weisen Nennleistungen unter 500 kW, und weniger als 5% der Anlagen weisen solche über 2000 kW auf. Die häufigsten Anwendungen finden sich mit diesen biogenen Brennstoffen im mittleren Leistungsbereich zwischen 150 kW und 2 MW. Die meisten in Betrieb stehenden automatischen Holzfeuerungen sind nach dem Prinzip der Unterschubfeuerung mit einer Verbrennungsrorte sowie der Rostfeuerung mit einem festen, bei Klein- und Vorofenfeuerungen, oder bewegten Verbrennungsrost für grössere Leistungen gebaut. Nebst den beiden Feuerungssystemen werden auch zahlreiche Sonderbauformen betrieben. Eine spezielle Bauart der Unterschubfeuerung ist die Rotationsfeuerung mit dem Rotationsgebläse, das die Brennstoffgase intensiv mit der Sekundärluft durchmischt, und dadurch mit niedrigem Luftüberschuss betrieben werden kann. Eher ältere Anlagen stehen noch mit der Einblasfeuerungstechnik vor allem in der Holzindustrie in Betrieb, wo trockene und fein- bis staubkörnige Brennstoffe anfallen.

Die Auswahl des geeigneten Feuerungssystems wird hauptsächlich anhand des zur Verfügung stehenden Energieholzsortimentes getroffen.

Die hauptsächlichsten Unterschiede zwischen der Unterschub- und der Rostfeuerung bestehen in der Beurteilung der einsetzbaren Brennstoffqualität und im Leistungsbereich.

Die in der Anschaffung günstigere Unterschubfeuerung wird vor allem im Leistungsbereich zwischen 20 und 2000 kW, bei Brennstoffqualitäten mit 5 - 50% Wassergehalt und Aschegehalten <1% eingesetzt.

Rostfeuerungen sind sehr universell einsetzbar. Sie eignen sich auch für Brennstoffe mit Wassergehalten >65%, für variierende Korngrössen, für Mischungen sowie für Brennstoffe mit grossem Aschegehalt bis 40%.

### **3.2 Brennstoff**

Die Praxis zeigt, dass bei den biogenen Brennstoffen eine Vielzahl zellulosehaltiger Brennstoffkategorien thermisch genutzt werden.

Basis für die Konstruktion emissionsarmer Holzfeuerungen ist die Kenntnis des Verbrennungsablaufs über die Stufen Trocknung, thermische Zersetzung, Vergasung und Ausbrand der Gase sowie die damit verbundene Bildung von Schadstoffen. Die Schadstoffbildung ist abhängig von der Brennstoffzusammensetzung und den Verbrennungsbedingungen.

Die eingesetzten Brennstoffe können nach Art, Form und Qualität charakterisiert werden:

- Art:**
- naturbelassenes Nadel- und Laubholz aus Wald und Industrie
  - Restholz aus der Holzverarbeitung (Sägerei, Zimmerei, Schreinerei, Möbelproduktion, etc.)
  - Verpackungsholz, Spanplatten, MDF-Platten, Paletten, Kisten, etc.

- Form:**
- Rinde, Hackschnitzel, Späne, Sägemehl, Staub
  - Pellets, Briketts

Im Brennstoffgemisch, speziell der Holzverarbeitenden Betriebe, befinden sich vermehrt Stäube mit immer feineren Korngrößen (Medianwert  $M < 20 \mu\text{m}$ ). Diese entstehen durch Bearbeitungsvorgänge von kompakten Materialien mit enorm hohen Werkzeugdrehzahlen und hauptsächlich durch Feinschliffe der Produkteoberflächen.

- Qualität:**
- Wassergehalt 5 bis >60%
  - Dichte 50 bis 1000  $\text{kg/m}^3$
  - Aschegehalt und Ascheschmelzpunkt

Nebst diesen sogenannten unbedenklichen biogenen Brennstoffen, werden auch schadstoffbelastete zellulosehaltige Brennstoffe in Form von Altholz, Papier und Karton und teilweise auch häusliche Abfälle mitverbrannt. Ebenfalls sind im gesamten Brennstoffspektrum Anteile von anorganischen Stoffen und metallischen Fremdkörpern enthalten, die als Rückstände mit der Asche entsorgt werden müssen.

### **3.3 Betrieb und Regelung der Feuerungsanlagen**

Die bestehenden Emissionsvorschriften verlangen deren Einhaltung bei einem Feuerungsbetrieb zwischen Nenn-Wärmeleistung und der Minimalleistung.

Die Nenn-Wärmeleistung ist die bei definiertem Brennstoff maximal ans Wasser abgeführte Wärmeleistung.

Die Minimalleistung wiederum ist die bei kontinuierlichem Kesselbetrieb minimal ans Wasser abgeführte Wärmeleistung.

Sinkt der Wärmeleistungsbedarf unter diese niedrigste Teilleistung, geht die Feuerung in den Teillastbetrieb (Ein-Aus-Betrieb) und Glutunterhalt (Stand-by). Bekanntlich werden die meisten Holzfeuerungen ganzjährig in Betrieb gehalten, um für den Einzelbedarf und im Wärmeverbund den Gebrauchswarmwasserbedarf zu decken.

Wenn man im schweizerischen Mittelland für Raumwärme und Warmwasser von einer Vollastbetriebsstundenzahl der Feuerung von <2000 h/a ausgeht, den Feuerungsbetrieb jedoch >8000 h/a aufrecht erhält, kann man die überwiegende Zeit mit Minimal-Leistungsbetrieb und intermittierendem Teillastbetrieb mit Glutbetherhaltung unterhalt einfach abschätzen. Diese Ein-Aus-Schaltungen im Teillastbetrieb führen zu allgemein erhöhten Emissionen und senken den Kesselwirkungsgrad auf <50%. Bezüglich Emissionen ist der Übergang von Glutbetherhaltung zu intermittierender Teillast oder zum kontinuierlichen Betrieb besonders kritisch. Die zu tiefe Brennkammertemperatur und die ungünstigen Brennstoff-/Luft-Verhältnisse führen zu erhöhten CO- und Staubemissionen.

Da in der Praxis Schwankungen des Leistungsbedarfs und der Brennstoffqualität auch zukünftig nicht zu vermeiden sind, werden die heutigen Feuerungen fast durchwegs mit den neuen Leistungs- und Verbrennungssteuerungen ausgerüstet. Diese umfassen die folgenden Regeleinrichtungen:

- Regeleinrichtung zur Stabilisierung der Verbrennung;
- Regeleinrichtung zur Anpassung der Wärmeleistung;
- Regeleinrichtung zur Minimierung der Emissionen.

Die in den vergangenen Jahren installierten und nachgerüsteten Feuerungen verfügen zum grossen Teil über die vorgenannten Regelungen. Die neuste Entwicklung geht dahin, dass die Leistungs- und Verbrennungsregelung im Kaskadenbetrieb gesteuert wird, wobei zur Sicherstellung des Feuerungsbetriebs zwischen den beiden Regelcharakteristiken eine klare Aufgabenteilung besteht. Die Leistungsregelung steuert die Feuerungsleistung sozusagen stufenlos als übergeordneten, langsamen Regelkreis. Die Verbrennungsregelung hingegen gewährleistet durch ständige Feinregulierung der Brennstoff- oder Verbrennungsluftmenge eine hohe Ausbrandqualität und einen hohen Wirkungsgrad.

Als weitere Entwicklung können die Regelparameter der Feuerraumtemperatur, die CO/Lambda-Regelung und ergänzend auch die Brennstoffschichthöhe die Regelung von Leistung und Verbrennungsqualität optimieren. Bereits als Standard sorgt eine Differenzdruckmessung in der Brennkammer mit der stufenlosen Regelung der Rauchgasventilator-drehzahl für einen konstanten Unterdruck. Gleichzeitig wird damit die Einstellung der gewünschten Verbrennungsluftmenge und Gasgeschwindigkeit im Brennstoffbett sichergestellt.

Zusammenfassend ist der heutige Stand der Feuerungs- und Regelungstechnik so zu beurteilen, dass alle Primärmassnahmen, die zur Minderung von Staubpartikelemissionen beitragen, weitgehend ausgeschöpft sind. Damit werden im betrieblichen Einsatz alle relevanten Betriebsparameter, wie

- Luftüberschuss in Primär- und Reduktionszone,
- Temperatur in Feuerraum und Brennstoffbett,
- Unterdruck in Brennkammer,
- Gasgeschwindigkeit im Brennstoffbett,
- Abgasrezirkulation in die Feuerung,
- und die Höhe des Glutbetts,

welche die Bildung von Partikelemissionen beeinflussen, geregelt.

Da bekanntermassen in der Praxis beschränkt bis kein Einfluss auf die Betriebsweise der Feuerung und auf die Zusammensetzung des Festbrennstoffgemischs genommen werden kann, ist es technisch machbar und sinnvoll, die Staubgrenzwerte auf ein Mehrfaches tiefer anzusetzen. Hinzu kommt, dass zwischen Prüfstandsmessungen und Messungen im ganzjährigen Praxisbetrieb, mit „gewaschenem“, bzw. tatsächlichen Festbrennstoff, deutliche Unterschiede bei den Partikelemissionen bestehen (auf dem Prüfstand resultieren im Vergleich zum Praxisbetrieb immer tiefere Staubwerte).

Die Schweizerische Luftreinhalte-Verordnung (LRV) begrenzt die Partikelemissionen von Holzfeuerungen aufgrund der Massenkonzentration:

Feuerungswärmeleistung	Grenzwert Staub	Bezugs-Sauerstoffgehalt
- 70 kW bis 1 MW	150 mg/Nm <sup>3</sup>	13 Vol.-% O <sub>2</sub>
- 1 MW bis 5 MW	150 mg/Nm <sup>3</sup>	11 Vol.-% O <sub>2</sub>
- > 5 MW	50 mg/Nm <sup>3</sup>	11 Vol.-% O <sub>2</sub>

Die gesundheitsrelevante Grösse der Partikel und deren chemische Zusammensetzung werden bislang nicht berücksichtigt.

### 3.4 Ist-Zustand Rauchgasreinigung

Zur Einhaltung der heutigen Staubgrenzwerte werden bei automatischen Holzfeuerungen hauptsächlich Trägheitsentstauber (Zyklone) und nur vereinzelt filternde Abscheider eingesetzt.

Die im Rauchgas mitgeführten Staubpartikel werden durch die hohen Fliehkräfte der rotierenden Strömung im Zyklon an dessen Aussenwand geschleudert und durch das Zentralrohr nach unten ausgeschieden. Ein Hauptproblem dieser Fliehkraftabscheider besteht in der zunehmenden Undichtheit über die Betriebsdauer, da mit der angezogenen Falschluff die Staubpartikel vom Ventilator angezogen und ins Freie geblasen werden. Die Abscheidewirkung der Trägheitsentstauber hängt von folgenden Faktoren ab:

- Korngrösse;
- Partikeldichte;
- Partikelgeometrie;
- Druckverlust.

Je nach Körnung und Staubart können Partikel erst ab 2 bis 5 µm Partikelgrösse wirksam abgeschieden werden. Der Abscheidegrad von Multizyklonabscheidern liegt auch bei optimierter Fahrweise der Feuerung im Bereich von 100 bis 200 mg/Nm<sup>3</sup> Staub.

Bis heute liegen nur wenige verlässliche Ergebnisse von Partikelemissionsmessungen im Feinststaubbereich (Partikeldurchmesser <10µm) **gemessen im Rohgas** von automatischen Feststofffeuerungen der Leistungsgrösse 500-2000 kW vor.

Betrachtet man die vorliegenden Ergebnisse der an Versuchsanlagen und bei Einsatz von Referenzbrennstoff Buchenholz, mit geringem Fremd-, Fein- und Rindenanteil durchgeführ-

ten Untersuchungen zu Feinstaubemissionen bei Holzfeuerungen, so muss festgestellt werden, dass etwa drei Viertel der Partikelmasse aus Partikeln mit einem aerodynamischen Durchmesser von unter 1 µm stammen. Diese Partikelfraktion kann auch mit einem ideal ausgelegten Feuerungssystem mit Multizyklonabscheider nicht abgeschieden werden. Dies bedeutet, dass ein Reingasstaubgehalt von 50 mg/Nm<sup>3</sup> mit Trägheitsabscheider auch bei geeigneten Betriebsbedingungen nicht erreicht werden kann.

Für zukünftige Verbesserungen der Staubemissionen von Holzfeuerungen sind deshalb die Partikel im Submikronbereich, die drei Viertel der Staubpartikelmasse ausmachen, von vorrangiger Bedeutung.

## **4. Ist-Zustand Staubminderung bei automatischen Holzfeuerungen**

### **4.1 Einleitung**

Die Rauchgasentstaubung für automatische Holz-/Biomassefeuerungen mit niedrigen Feuerungsleistungen beschränkte sich bislang aufgrund der LRV-Staubgrenzwerte auf den Einsatz von Fliehkraftabscheidern (Zyklonen).

Die sogenannten Multizyklonabscheider werden von den Feuerungs- und Kesselherstellern in der Regel als Einheit mit der Gesamtanlage geliefert. Die Gesamtabseidegrade dieser Trägheitsentstauber liegt bei ca. 60 – 80 %.

Bekanntlich werden in vielen Fällen die automatischen Holzfeuerungen für die Emissionsmessungen passend eingestellt, um die Grenzwerte annähernd zu erreichen. Es ist auch unbestritten, dass beim Betrieb von älteren und kleinen Holzfeuerungen Betriebszustände und Betriebsweisen auftreten, die den Einsatz von filternden Abscheidern erschweren. Dank bereits eingeleiteter Zusammenarbeit zwischen Herstellern von Filtern und Feuerungen sind jedoch auch in diesem Bereich Verbesserungen zu erwarten.

Als kritische Punkte beim Einsatz von Feinstaub- und Staubfiltertechnik in Holzfeuerungen sind u.a. zu nennen:

- Brennstofffeuchte, oft wechselnd zwischen 10 – 50 %;
- Lastwechsel und Abschaltungen, besonders während Sommerzeit und nächtlichen Stillstandphasen mit niedrigen Abgastemperaturen von 120 – 180°C;
- Abfahren der Anlage über das Wochenende;
- Hoher O<sub>2</sub>-Gehalt im Abgas bis zu 17%;
- Schlechter Ausbrand mit hohem Anteil an Unverbranntem in der Flugasche;
- Zeitweise händische Brennstoffbeschickung mit nicht erlaubten Brennstoffen bzw. Abfällen;
- Fehlende Unterdruckregulierung;
- Undichte Staubtonnen und fehlende Absperrungen um die Behälter während des Feuerungsbetriebes entleeren zu können.

Zur Abscheidung von partikelförmigen Emissionen können die folgenden Abscheidesysteme eingesetzt werden:

- Fliehkraftabscheidung (Zyklon, Multizyklone);
- Gewebefilter;
- Elektrofilter;
- Rauchgaskondensation;
- Nassabscheider.

Der Einsatzbereich der verschiedenen Abscheidesysteme ist in Abbildung 1 dargestellt. Tabelle 1 gibt eine Übersicht charakteristischer Daten verschiedener Entstaubungssysteme.

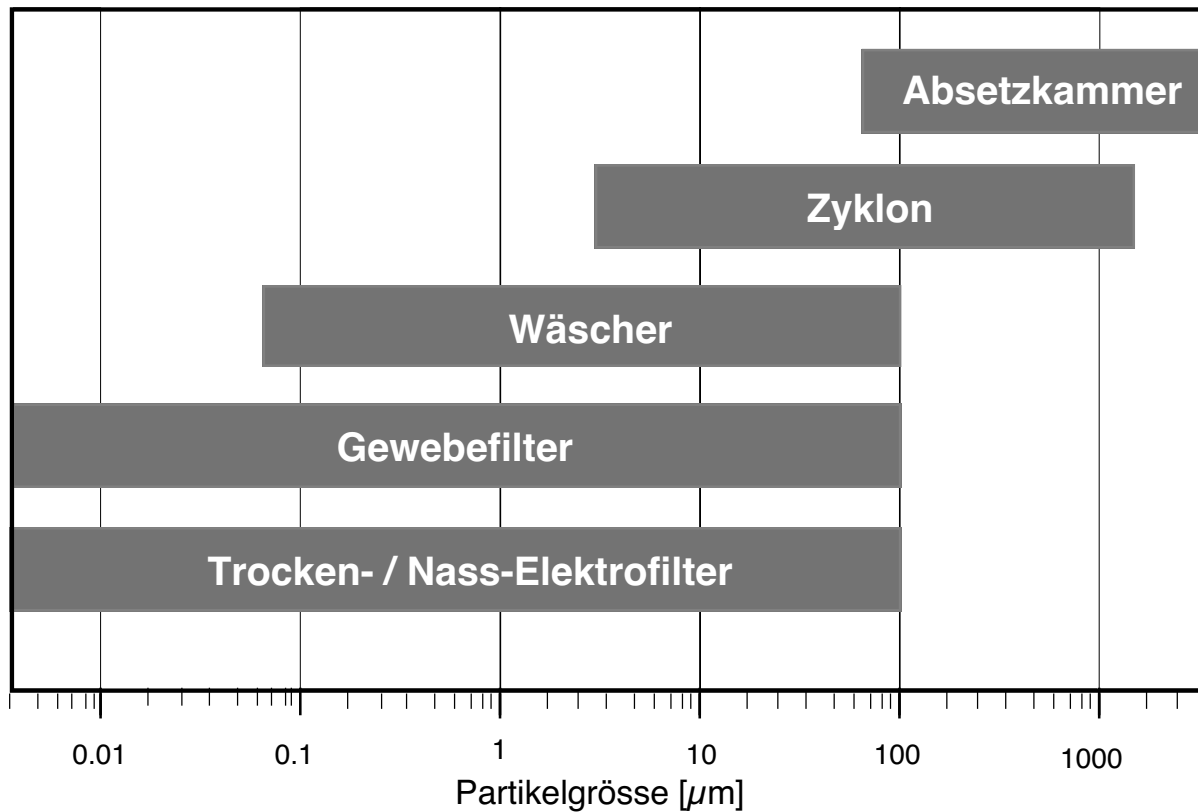
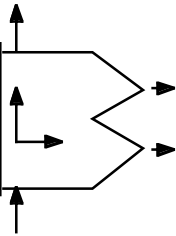
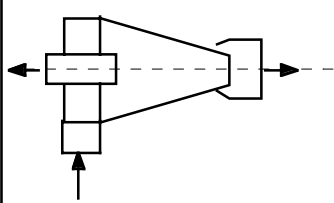
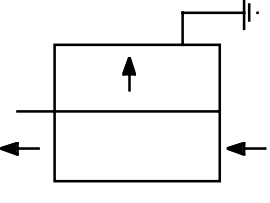
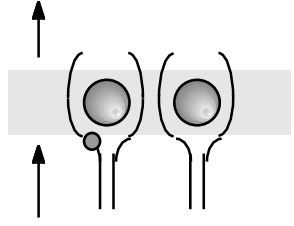
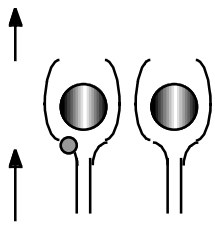


Abbildung 1: Einsatzbereich der verschiedenen Staubabscheidungsanlagen

Tabelle 1: Übersicht Entstaubungssysteme

	Schwerkraft-entstauber	Fliehkraft-entstauber	Elektrofilter	Filtrations-entstauber	Nass-entstauber
<b>Schema</b>					
<b>Verschiebungs-kräfte</b>	Schwerkraft	Fliehkraft	elektrische Kräfte	Trägheitskräfte, thermo-dynamische (Diffusion) und elektrische Kräfte	Trägheitskräfte, thermo-dynamische (Diffusion) und elektrische Kräfte
<b>Abtrennungs-ursachen</b>	Schwerkraft im Strömungstotraum	Überschreiten der Grenzbelastung insbesondere an der Wand	Haftkräfte	Gitterwirkung Haftkräfte	Grenzflächen-kräfte
<b>Reinigung des Abtrennungs-raumes</b>	Mechanische Transportmittel	kontinuierlich durch Schwerkraft und Strömungskräfte	periodisch durch Abrütteln des Staubes, Flüssigkeitsfilm	periodisches Abrütteln oder Rückblasen	Flüssigkeitsfilm im Durch- oder Umlauf

## **4.2 Zusammenfassung Stand der Technik der Entstaubung bei automatischen Holzfeuerungen**

Zusammenfassend ist der Stand der Technik bei der Entstaubung bei Biomassefeuerungen wie folgt zu beurteilen:

- Es werden sowohl Gewebefilter als auch Elektrofilter eingesetzt;
- Bei kleinen Feuerungen mit Rauchgasvolumenströmen unter 10'000 Nm<sup>3</sup>/h werden überwiegend Elektrofilter eingesetzt;
- Elektrofilter werden in einem sehr breiten Grössenbereich, beginnend bei wenigen 1'000 Nm<sup>3</sup>/h bis zu Grossfeuerungen mit 80'000 Nm<sup>3</sup>/h eingesetzt;
- Die Anlagen sind in der Regel auf Reingasstaubgehalte von 20-50 mg/Nm<sup>3</sup>/h ausgelegt.
- Mit Elektrofiltern können grundsätzlich sehr hohe Abscheidegrade über 99% erreicht werden (Beispiel KVA's). Die bislang geltenden Emissionsgrenzwerte im Bereich der Holzfeuerungen haben aber dazu geführt, dass die Abscheidegrade der in Holzfeuerungen eingesetzten Elektrofilter deutlich tiefer liegen.
- Gewebefilter haben sich bei kleineren Anlagen aus technischen Gründen (Funkenflug, Taupunktunterschreitung) sowie wegen des fehlenden Druckes durch verschärfte Grenzwerte nicht durchgesetzt. Gewebefilter werden vorwiegend bei Feuerungen mit schadstoffbelasteten Brennstoffen eingesetzt. Sie erlauben die Schadstoffminderung durch Trockensorption und Adsorption.

## **4.3 Anlagensicherheit**

### 4.3.1 Gefahren durch brennbare Stäube und Filtermedien

Eine Entzündung und fortschreitende Verbrennung ist nur möglich, wenn an derselben Stelle und gleichzeitig folgende Kriterien vorhanden sind:

- eine exotherm oxidierbare Staubschicht,
- ausreichend Sauerstoff und
- eine wirksame Zündquelle.

Diese Voraussetzungen sind bei einer automatischen Holzfeuerung mit nachgeschalteter Rauchgasreinigung gegeben. Brände in abgelagerten Stäuben können auftreten als offener Brand mit Flamme Schwel- oder Glimmbrand.

Grundsätzlich sind Brandschutzmassnahmen in vorbeugender und abwehrender Art zu unterscheiden.

### 4.3.2 Schutzmassnahmen

Massnahmen zur Vermeidung von Staubbränden sind bereits bei der Planung von Anlagen zu berücksichtigen. Diese unterscheiden sich in:

#### a) Bauliche Massnahmen

Gemäss den Brandschutzvorschriften sind Anlagen von Bauten so voneinander zu trennen oder zu schützen, dass Brände oder Explosionen nicht auf benachbarte Anlagen, Räume oder Gebäude übergreifen können.

#### b) Verfahrenstechnische Vorkehrungen

Aufgabe der Planung muss es sein, die Wahrscheinlichkeit eines Funkenflugs in den Rauchgasfilter, überhöhte Rauchgastemperaturen und brennbare Staubrückstände im Filter möglichst klein zu halten. Dazu sind für alle in Frage kommenden Filtersysteme folgende Kriterien zu erfüllen:

- Feuerung und Abhitzeessel richtig aufeinander abstimmen;
- Regeleinrichtung zur Stabilisierung der Verbrennung vorsehen;
- Unterdruck in der Brennkammer konstant halten;
- Vorabscheidung von Grobstaubpartikeln und Funken durch Integration eines Zyklonabscheiders nach Abhitzeessel;
- Bypassleitung für Gewebefilter mit Überwachung der Rohgastemperatur;
- Auswahl des geeigneten Filtermediums zum Schutze gegen überhöhte Betriebstemperaturen;
- Automatische Pulse-Jet Abreinigung der Filteroberfläche;
- Auftragen von Precoatisierungs-Pulver zur Verhinderung von Schäden durch Funkenflug;
- Verhinderung von Falschlufteinbringung in das Rohgassystem;
- Kontinuierliche Entfernung des Staubes aus der Filterkammer (Zellenradschleuse oder Doppel-Pendelklappen);
- Feuerbeständige Konstruktion und Isolation der Filterkammer.

c) Abwehrender Brandschutz

Wichtig für eine wirkungsvolle Brandbekämpfung ist die frühzeitige Entdeckung von Bränden durch Melder, die auf Wärme, Wärmedifferenz, Kohlenmonoxid, Druckdifferenz, etc. reagieren.

Filter-/Staubbrände lassen sich z.B. bekämpfen durch:

- Anwendung von Feuerlöschmitteln;
- Fernhaltung des Sauerstoffs vom Brandgut.

Zur Reduzierung der Explosionsgefahr muss bei der Brandbekämpfung das Aufwirbeln von Staub verhindert werden.

Bei der Auswahl des Feuerlöschmittels und der Löschmassnahmen sind die Art des Staubes, die äusseren Umstände und mögliche gefährliche Anlagen (Elektro-Filter) in der Nähe des Brandes in Betracht zu ziehen.

Zur Brandbekämpfung der meisten organischen Stoffe sind folgende Löschmittel geeignet:

- Löschwasser mit Sprühstrahl oder Vernebeln mit Spezialdüsen;
- Löschschaum zum Ablöschen von Oberflächenbränden;
- Löschpulver mit Pulverbrausen;
- Löschgase wie Kohlendioxid und Halone.

d) Betrieb

Die Beschäftigten sind über den Betrieb der automatischen Holzfeuerung, mit Anfahren und Abfahren der Filteranlage und über das sicherheitsgerechte Verhalten zu unterweisen. Die Überwachung hängt von zahlreichen Kriterien ab und ist betriebsintern festzulegen. Hierzu sind Betriebsanweisungen aufzustellen.

## 5. Zusatzkosten durch die Nachrüstung bestehender Holzfeuerungen mit Entstaubungsanlagen

Um die Mehrkosten der Nachrüstung von modernen automatischen Holzfeuerungsanlagen mit Entstaubungsanlagen abschätzen zu können, wurden Richtpreisangebote für automatische Holzfeuerungen mit ca. 500 und 2000 kW Feuerungswärmeleistung eingeholt.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 2 dargestellt. In den Kosten sind keine Investitionen für die Brennstofflagerung und das Gebäude enthalten.

Die Mehrkosten für Entstaubungsanlagen bei den Feuerungsgrößen 500 und 2000 kW sind in den Abbildungen 3 und 4 dargestellt.

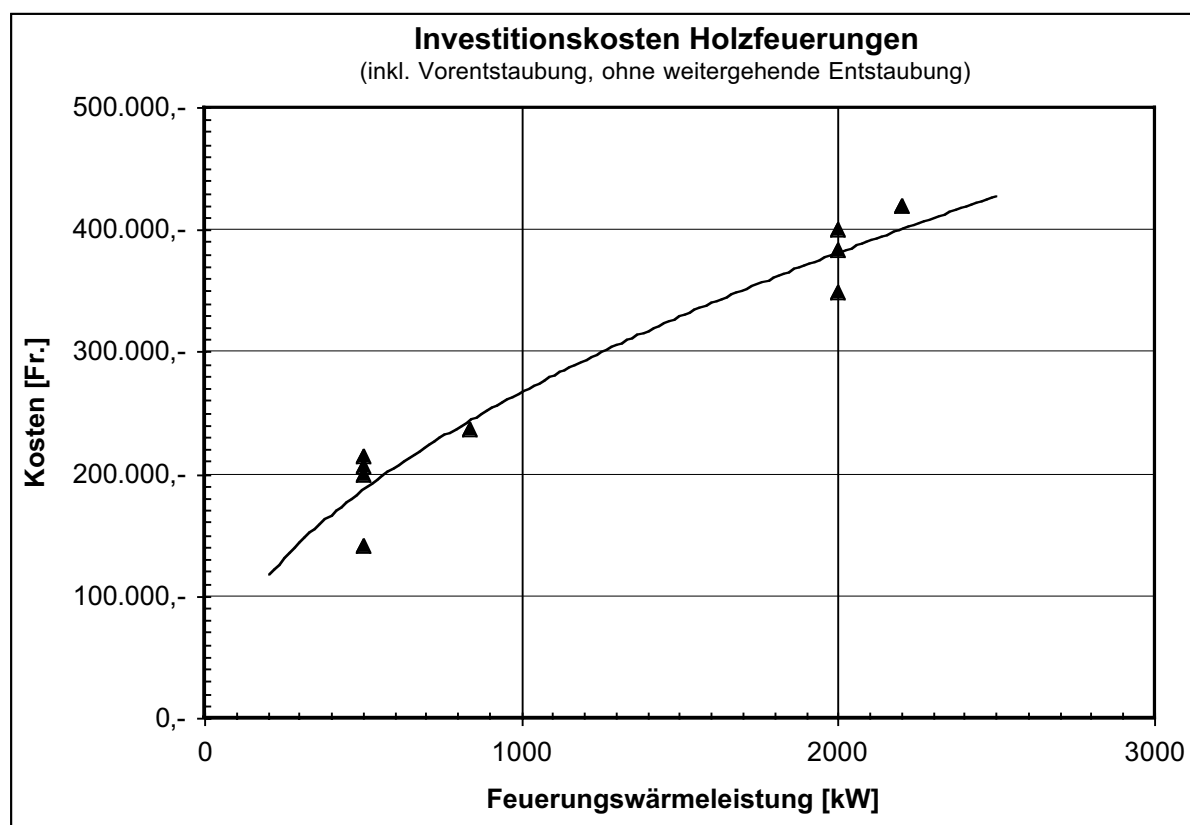


Abbildung 2 Investitionskosten automatischer Holzfeuerungsanlagen

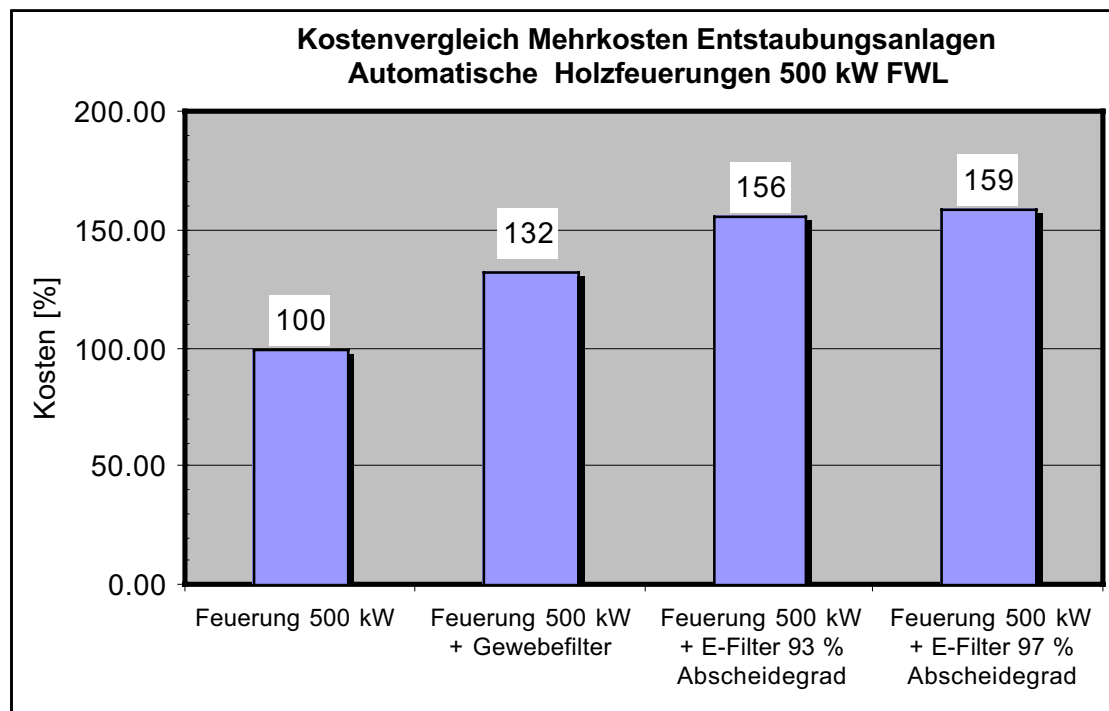


Abbildung 3: Mehrkosten Entstaubungsanlagen bei einer automatischen Holzfeuerungsanlage mit 500 kW Feuerungswärmeleistung

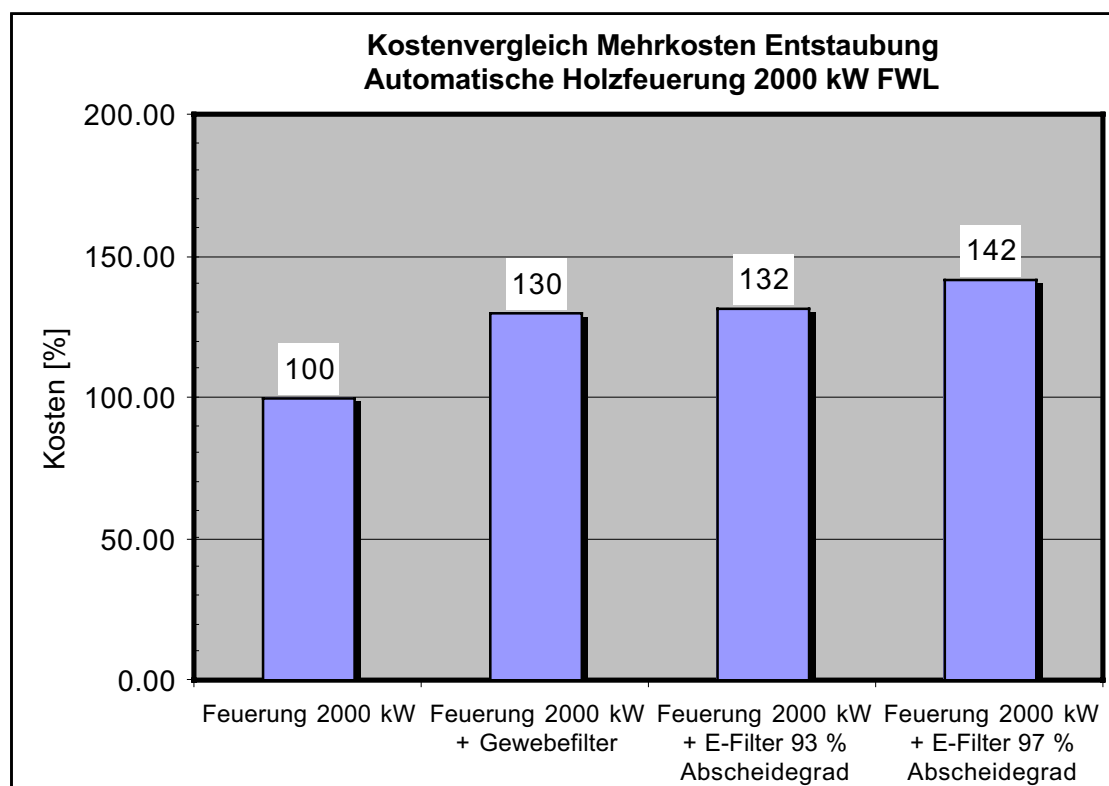


Abbildung 4: Mehrkosten Entstaubungsanlagen bei einer automatischen Holzfeuerungsanlage mit 2000 kW Feuerungswärmeleistung

Die Abbildungen 3 und 4 verdeutlichen, dass bei kleineren Feuerungen der Gewebefilter die kostengünstigere Lösung darstellt. Bei einer Feuerungswärmeleistung von 2000 kW ist der Kostenvorteil für den Gewebefilter nur noch gering.

Zu beachten ist, dass die meisten modernen automatischen Holzfeuerungsanlagen bereits über eine integrierte Vorentstaubung verfügen. Mit einem Abscheidegrad von 93 % des Elektrofilters kann somit ein Reingasstaubgehalt von 20 mg/Nm<sup>3</sup> eingehalten werden.

Die in den Abbildungen 2 und 3 enthaltenen Kosten beinhalten keine technischen und baulichen Anpassungskosten. Diese sind stark abhängig von den konkreten Gegebenheiten. Mit Sicherheit ist bei einer Nachrüstung eines Gewebefilters eine Anpassung des Saugzuges notwendig. Weiterhin entstehen Kosten durch die notwendige Einbindung der Entstaubungsanlage in die Steuerung der Feuerungsanlage sowie durch die Anpassung der Roh- und Reingasleitungen.

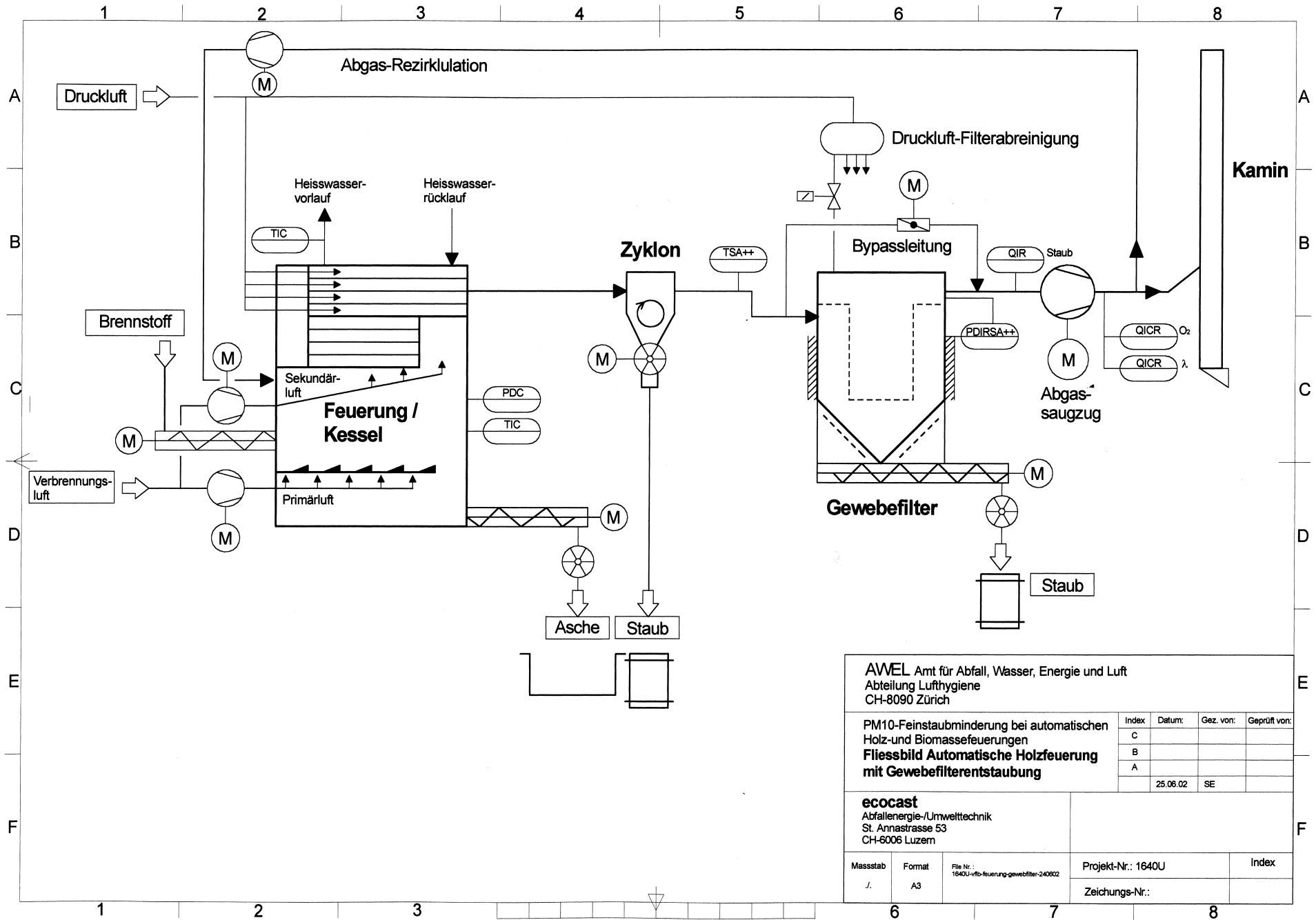
## 6. Schlussfolgerungen

- Grundsätzlich sind Reingasstaubgehalte von 10 und 20 mg/m<sup>3</sup> auch bei kleinen automatischen Holzfeuerungen (FWL 500 kW) technisch machbar;
- Bei kleineren Holzfeuerungen (FWL > 2 MW) wurden bislang vorwiegend Elektrofilter eingesetzt. Die Anlagen sind auf Reingasstaubgehalte zwischen 20 und 50 mg/m<sup>3</sup> ausgelegt. Gewebefilter kamen aufgrund der bekannten Nachteile dieses Systems, (Brandgefahr und Notwendigkeit des Anfahrbypasses) kaum zum Einsatz.
- In Bereich der Feuerungsgrösse 2000 kW bestehen zahlreiche Referenzanlagen vorwiegend mit Elektrofiltern vor allem in Deutschland und Österreich. Die garantierten Reingasstaubgehalte liegen mit wenigen Ausnahmen bei Werten von 20 mg/m<sup>3</sup> oder höher.
- Bei Altholzfeuerungen werden bevorzugt Gewebefilter eingesetzt. Die Kombination mit Zugabe eines Sorptionsmittels und Abscheidung am Gewebefilter erlaubt eine relativ kostengünstige Rauchgasreinigung und die wirksame Abscheidung der gasförmigen Schadstoffe. In der Regel weisen Altholzfeuerungen eher grössere Leistungen auf (einige MW). Auch gestattet der Erlös aus der Entsorgung die Installation einer besseren Technik.
- Die Marktabfrage hat ergeben, dass bei Feuerungsleistungen von 500 kW Gewebefilter kostengünstiger sind. Bei Feuerungsgrössen von 2000 kW ist die Kostendifferenz zwischen Gewebe- und Elektrofilter klein. Bei Feuerungen oberhalb 5 MW dürfte der Elektrofilter die kostengünstigere Lösung darstellen.  
Bei der Kostenbetrachtung muss zwischen Nachrüstungen und Neuanlagen unterschieden werden. Die in Kapitel 5 aufgeführten Kosten beziehen sich auf Neuanlagen. Bei Nachrüstungen ist je nach Gegebenheit mit nicht unbeträchtlichen Mehrkosten zu rechnen (Schätzung Mehrkosten +30 %).
- Das Abscheideverhalten der beiden Systeme Gewebe- und Elektrofilter ist im Feinstaubbereich bislang nicht umfassend untersucht worden. Zum Vergleich können PM10 Messungen an verschiedenen Schweizer Kehrichtverbrennungsanlagen herangezogen werden. Die dort eingesetzte Anlagentechnik (vorwiegend Elektrofilter als Entstaubungsstufe) wird allerdings in der Regel auf sehr tiefe Reingasstaubwerte ausgelegt. Aufgrund dieser Messungen kann gesagt werden, dass Gewebefilter bis in den Partikelgrössenbereich von 50-100 nm sehr hohe Abscheidegrade von über 99% aufweisen. Elektrofilter zeigen dagegen im Bereich von 0.1-1 µm Partikelgrösse einen Abfall des Abscheidegrades. Bei kleinen Anlagengrössen weist der Elektrofilter weiterhin auch Probleme mit der Strömungsführung auf, die bei Grossanlagen nicht auftreten.
- Reingasstaubgehalte von 10 mg/m<sup>3</sup> führen bei kleinen Feuerungen bei den Elektrofiltern zu unwirtschaftlichen Lösungen. Inwieweit die Optimierung der Herstellungskosten für die Hochspannungsanlage zu einer Kostensenkung führen wird, lässt sich zur Zeit nur schwer abschätzen.
- Sowohl beim Gewebe- als auch beim Elektrofilter sind beim Betrieb der Feuerungsanlage, dem An- und Abfahren sowie der Abdichtung gegen Eindringen von Falschluff besondere Beachtung zu schenken.

- Beim Gewebefilter bleibt das Problem der Brandgefahr und des Anfahrbetriebes bestehen. Der Brandgefahr kann durch eine wirksame Staubvorabscheidung begegnet werden. Beim Anfahren der Feuerung muss der Gewebefilter umfahren werden, solange die Rauchgastemperatur unter 80 °C liegt. Geht man davon aus, dass der Anfahrvorgang ca. 10 Minuten dauert und dass während dieser Zeit der Reingasstaubgehalt 150 mg/m<sup>3</sup> beträgt, so ergibt sich für eine 2 MW Feuerung bei 3000 Volllastbetriebsstunden pro Jahr bei täglichem Anfahren eine Staubfracht aus dem Bypassbetrieb von ca. 36 kg Staub pro Jahr, verglichen mit 120 kg Staub aus dem Volllastbetrieb (Reingasgehalt 10 mg/m<sup>3</sup>).  
Zu bedenken ist, dass der angenommene Reingasgehalt von 150 mg/m<sup>3</sup> beim Anfahrvorgang eher optimistisch ist. Der reale Anlagenbetrieb ist somit bei der Frachtbetrachtung von grosser Bedeutung. Dies gilt übrigens auch für den Elektrofilter, da auch dieser beim Anfahrvorgang eine schlechtere Abscheideleistung zeigt.
- Insgesamt liegen zum Betriebsverhalten von Holzfeuerungen mit Entstaubungsanlagen nur ungenügende Erfahrungen vor. Dies betrifft insbesondere die Einbindung der Entstaubung in die Gesamtanlage, das Verhalten bei diskontinuierlichem und Teillastbetrieb sowie die Frage des Einflusses des Bypassbetriebes auf die Emissionsfrachten.
- Das Abscheideverhalten der Systeme im Feinststaubbereich, ist bei Holzfeuerungen nur ungenügend untersucht. Messungen drängen sich vor allem beim Elektrofilter auf, da dieses System im Vergleich zum Gewebefilter empfindlicher auf schwankende Betriebsbedingungen reagiert.
- Die Festlegung eines verschärften Staubgrenzwertes bei Holzfeuerungen ab ca. 500 kW FWL beeinflusst die Wahl des Entstaubungssystems. Ein Grenzwert von 10 mg/m<sup>3</sup> führt bei kleineren Feuerungen bei den Elektrofiltern zu unwirtschaftlichen Lösungen. Bei einem Grenzwert von 20 mg/m<sup>3</sup> können sowohl Gewebe- als auch Elektrofilter eingesetzt werden. Die Wahl muss dann anhand der konkreten Anlagenbedingungen und Angebote getroffen werden.
- Da sich bei Holzfeuerungen die Staubproblematik eindeutig auf den Feinststaubbereich konzentriert, muss bei der Festlegung der verschärften Grenzwerte das Augenmerk vor allem auf diesen Punkt gelegt werden. Handlungsbedarf besteht nach unserer Meinung zur Zeit in der Untersuchung des Verhaltens der Entstaubungsanlagen im realen Betrieb sowie in der Ermittlung verlässlicher Daten zum Abscheideverhalten im Feinststaubbereich (< 1 µm).

## **Anhang**

### **Fliessbild Holzfeuerung mit Gewebefilter**



**AWEL** Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft  
 Abteilung Lufthygiene  
 CH-8090 Zürich

Index	Datum:	Gez. von:	Geprüft von:
C			
B			
A	25.06.02	SE	

**PM10-Feinstaubminderung bei automatischen Holz- und Biomassefeuerungen**  
**Fließbild Automatische Holzfeuerung mit Gewebefilterentstaubung**

**ecocast**  
 Abfallenergie-/Umweltechnik  
 St. Annastrasse 53  
 CH-6006 Luzern

Massstab	Format	File Nr.:	Projekt-Nr.:	Index
J.	A3	1640U-vfb-feuerung-gewebefilter-240902	1640U	
			Zeichnungs-Nr.:	