

# Ersatzmethode

Bei strikter Auslegung der Luftreinhalte-Verordnung 2007 kann für Holzfeuerungen mit Feinstaubabscheidern die Pflicht zu einer kontinuierlichen Messung und Überwachung der Emissionen abgeleitet werden. Da dies unverhältnismässig hohe Kosten verursacht, wird im vorliegenden Beitrag eine Ersatzmethode vorgeschlagen, die auf einer periodischen Messung und der kontinuierlichen Erfassung von Betriebszeiten von Abscheider und Feuerung basiert. Sofern diese Methode zur Anlagenkontrolle bereits in der Projektierungsphase eingeplant wird, kann sie mit vertretbarem Aufwand realisiert werden und die Einhaltung der Emissionsbegrenzung im Jahresmittel sicherstellen.

VON THOMAS NUSSBAUMER UND JÜRGEN GOOD

Zur Erfüllung der Ersatzanforderung muss jeder Feinstaubabscheider eine minimale Verfügbarkeit erzielen, die von den Emissionswerten im Roh- und Reingas abhängig ist. Kurzfristige Überschreitungen werden dabei zwar nicht erfasst. Im Vergleich zu einer lediglich periodischen Überwachung der Reingaswerte wird dadurch aber ausgeschlossen, dass Feinstaubabscheider unter hoher Kostenfolge installiert werden, aber in der Praxis nur einen geringen Nutzen aufweisen, weil sie zu einem relevanten Teil der Betriebszeit umgangen oder mit reduzierter Leistung betrieben werden. Die Methodik wurde im Auftrag des Amtes für Abfall, Wasser, Energie und Luft (Awel) des Kantons Zürich erarbeitet und soll sicherstellen, dass einerseits die Anforderungen der Luftreinhalteverordnung erfüllt und andererseits eine weitere Förderung der Holzenergie in Anlagen mittlerer Grösse nicht behindert wird [1].

## Emissionsgrenzwerte und allgemeine Bestimmungen

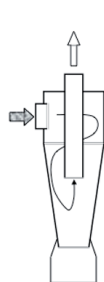
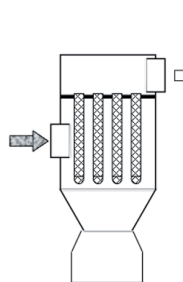
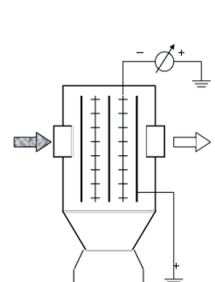
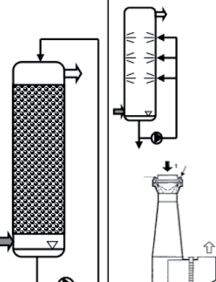
Die Überarbeitung der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) im Jahr 2007 hat für Holzfeuerungen weitreichende Konsequenzen. Unter anderem wird für Anlagen ab 500 kW der Einsatz

### Prof. Dr. Thomas Nussbaumer

Professor für Bioenergie an der Hochschule Luzern – Technik & Architektur in Horw und Inhaber der Firma Verenum in Zürich.

### Dr. Jürgen Good

Senior Research Scientist an der Hochschule Luzern, Projektleiter bei Verenum und Q-Beauftragter für QM Holzheizwerke.

1. Massenkraft-Abscheider		2. Filternde Abscheider		3. Elektrische Abscheider (≠ Filter !)		4. Nasswäscher + Massenkraftabscheider	
> 50 µm	> 5 µm	bis 0.01 µm		bis 0.01 µm		> 1 µm	
Schwerkraft	Fliehkraft	Speicherfilter mit Tiefen-Filtration (im Filter)	Abreinigungsfilter mit Oberflächen-Filtration (Kuchen)	Trocken-Elektro-abscheider	Nass-Elektro-abscheider	Durchströmte Flüssigkeit	Tropfchen-Eindüsung
Absetzkammer	Zyklon	Grobfilter, Schwabstofffilter (z.B. für Reingluft als Einwegfilter)	Gewebefilter, Taschen- und Schlauchfilter, Schütt-schichtfilter	Platten-EA (Rohr-EA)	Rohr-EA Platten-EA	Kolonnen-wäscher mit Böden oder Füllkörper	Waschturm, Venturi- und Radialstrom-wäscher
							

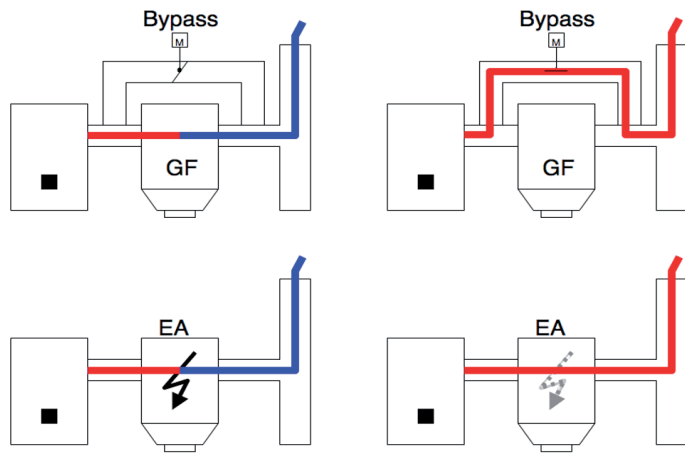
Grafik 1: Übersicht von Staubabscheidern (1 = Grobabscheider; 2, 3 und 4 = Feinstaubabscheider).

von Feinstaubabscheidern zwar nicht vorgeschrieben, jedoch aufgrund des von  $150 \text{ mg/m}^3$  auf  $20 \text{ mg/m}^3$  verschärften Grenzwerts in der Praxis in den meisten Fällen unumgänglich [2]. Die Grenzwerte gelten dabei für Anlagen bis 1 MW bei einer Bezugsgrösse von 13 Vol.-%  $\text{O}_2$  und ab 1 MW bei 11 Vol.-%  $\text{O}_2$ . Damit stellt sich für eine grosse Zahl kleiner und mittlerer Anlagen die Frage, wie die Bestimmungen der LRV bei einem Einsatz von Feinstaubabscheidern zu interpretieren und in der Praxis zu vollziehen sind. Nebst der Bestimmungen für Holzfeuerungen nach LRV Anhang 3 Ziffer 522 sind dies insbesondere die allgemein gültigen Artikel 13 bis 15 der LRV über die Kontrolle von stationären Anlagen. Diese Bestimmungen können entscheidende Konsequenzen haben, wenn eine Anlage über eine Abgasreinigung verfügt.

## Staubabscheidung bei Holzfeuerungen

Grafik 1 zeigt eine Übersicht der wichtigsten Verfahren zur Staubabscheidung aus Luft und Abgasen. Bestehende automatische Holzfeuerungen unter 1 MW verfügen meist über Multizyklone als Staubabscheider. Diese eignen sich zur Abscheidung von Stäuben mit Korngrössen über 5 Mikrometern, weshalb sie nicht unter die Kategorie der Feinstaubabscheider fallen und die mit der neuen LRV geforderten Reingaswerte in der Regel für normale Holzbrennstoffe nicht gewährleisten können.

Zur Feinstaubabscheidung bei automatischen Holzfeuerungen kommen heute vorwiegend Gewebefilter und Trockenelektroabscheider zum Einsatz [3–6]. Mit beiden Systemen können die neuen LRV-Grenzwerte im regulären Betrieb der Abscheider problem-



gungssystem bieten sich deshalb in erster Linie zur Wärmerückgewinnung bei Verwendung nasser Brennstoffe an. Für Stäube aus Holzfeuerungen weisen Nasswäscher jedoch nur eine beschränkte Effizienz auf, weshalb für grössere Anlagen Kombinationen von Elektroabscheidern und Nasswäschern eingesetzt werden [7].

### Kontinuierliche Überwachung

So legt etwa Artikel 13 Ziffer 4 fest: «Bei Anlagen, aus denen erhebliche Emissionen austreten können, ordnet die Behörde die kontinuierliche Messung und Aufzeichnung der Emissionen oder einer anderen Betriebsgrösse an, welche die Kontrolle der Emissionen ermöglicht». Sofern eine mehrfache Überschreitung des Grenzwertes als «erheblich» interpretiert wird, müssen somit Anlagen überwacht werden, die über einen Feinstaubabscheider verfügen, der phasenweise wirkungslos sein kann. Dies trifft zu für Gewebefiltern mit Bypass oder für Elektroabscheider mit der Möglichkeit zum Betrieb mit ausgeschalteter Hochspannung (siehe Grafik 2). Beide Situationen, also ein Bypass-Betrieb oder ein Betrieb mit reduzierter oder ausgeschalteter Hochspannung, treten in der Praxis im regulären Betrieb bei zu tiefer Abgastemperatur auf. Daneben können sie auch

**Grafik 2: Betrieb von Gewebefiltern (oben) und Elektroabscheidern (unten). Bei Überschreiten der Betriebstemperatur erfolgt eine effiziente Feinstaubabscheidung im Gewebefilter oder im Elektroabscheider (links). Bei Unterschreitung der Betriebstemperatur kommen für Gewebefilter oft Bypass-Leitungen zum Einsatz, während für Elektroabscheider eine Abschaltung oder Reduktion der Hochspannung erfolgt (rechts), weshalb die Betriebszeiten mit reduzierter oder unwirksamer Feinstaubabscheidung für eine Kontrolle der LRV entscheidend sind.**

los erreicht und teilweise deutlich unterschritten werden. Gewebefilter verursachen geringere Investitionskosten, jedoch gleichzeitig deutlich höhere Betriebskosten als Folge des hohen Druckverlusts und des Verbrauchs an Druckluft [4]. Zudem besteht das Risiko einer begrenzten Lebensdauer der Filterschläuche im Falle von häufiger Taupunktunterschreitung oder durch Glimmbrände. Da Gewebefilter besonders empfindlich auf Taupunktunterschreitung sind, wird ihr Einsatz nur für trockene Brennstoffe empfohlen.

Allerdings sind auch Trockenelektroabscheider für den Einsatz mit feuchten Abgasen nur dann geeignet, wenn die Abgastemperaturen nur während kurzer Dauer unter dem Taupunkt liegen, da sonst zum Beispiel mit Schäden an Isolatoren oder der Ansammlung von Kondenswasser zu rechnen ist. Beim Einsatz von Nasswäschern in Form von Waschtürmen oder Kolonnen wird dagegen eine Taupunktunterschreitung provoziert und damit eine teilweise Rückgewinnung der Kondensationswärme ermöglicht Nasse Abgasreini-

durch unsachgemässe Bedienung verursacht werden. Bei strenger Interpretation der LRV kann somit für Anlagen mit Feinstaubabscheidern aus Artikel 13 die Anordnung einer Überwachung abgeleitet werden.

Artikel 14 verlangt unter anderem, dass die «für die Beurteilung wichtigen Betriebszustände» erfasst werden. Als emissionsrelevante Zustände sind sicherlich der Abreinigungszyklus bei Feinstaubabscheidern, das Anfahren der Feuerung sowie der Teillastbetrieb zu betrachten. Somit ist abzuleiten, dass diese potenziell kritischen Zustände zu erfassen sind.

### Nachweis von Stunden- und Tagesmittelwerten

Artikel 15 verlangt unter anderem den Nachweis von Werten, die «über den Zeitraum von einer Stunde zu mitteln» sind. Sofern eine kontinuierliche Messung erfolgt, ist zudem ein detaillierter Nachweis der Einhaltung von Stunden- und Tagesmittelwerten zu erbringen. So darf etwa kein Stundenmittelwert den zweifachen Wert des Grenzwerts überschreiten. Daraus kann zum Beispiel abgeleitet werden, dass eine Holzfeuerung mit einem Staubgehalt im Rohgas von  $200 \text{ mg/m}^3$  und im Reingas von  $0 \text{ mg/m}^3$  bei einem mit Feinstaubabscheider somit eingehaltenen Emissionsgrenzwert von  $20 \text{ mg/m}^3$  nie länger als maximal 12 Minuten innert 60 Minuten ohne aktive Abscheidung betrieben werden darf. Zwei weitere Bedingungen in der LRV verlangen, dass kein Tagesmittelwert

den Grenzwert und 97 Prozent aller Stundemittelwerte das 1,2-fache des Grenzwerts nicht überschreiten. Im erwähnten Beispiel wäre dieser letztgenannte Wert im Fall einer Reingasemission von  $0 \text{ mg/m}^3$  bei einer rund siebenminütigen Abschaltung des Feinstaubabscheiders innert 60 Minuten erreicht, bei einem Reingaswert von  $10 \text{ mg/m}^3$  bereits nach rund 4 Minuten. Diese Beispiele zeigen, dass an den Betrieb einer Verbrennungsanlage besonders hohe Ansprüche gestellt werden, wenn zur Einhaltung der Grenzwerte ein Feinstaubabscheider zum Einsatz kommt. Gleichzeitig ist abzuschätzen, dass der detaillierte Nachweis der Einhaltung von Artikel 15 mit einem erheblichen Aufwand verbunden ist.

Zur Illustration der Zeitintervalle ist in Grafik 3 ein typischer Verlauf der wichtigsten Betriebsdaten einer automatischen Holzfeuerung dargestellt, die im Ein/Aus-Modus betrieben wird. Ein solcher Ein/Aus-Betrieb kann durch optimale Anlagenplanung vermindert [8], jedoch in den meisten Fällen nicht ganz vermieden werden. Das Beispiel illustriert, dass die für die Einschaltung der Feinstaubabscheider erforderliche Betriebstemperatur nach dem Anfahren der Feuerung oft erst nach einer Verzögerung von mehreren Minuten, unter Umständen gar von über 15 Minuten erreicht wird. Sofern eine Anlage häufige Einschaltzyklen aufweist und die Feinstaubabscheidung erst mit relevanter zeitlicher Verzögerung in Betrieb geht, können somit die Anforderungen der LRV nicht erfüllt werden. Aus diesem Grund ist durch

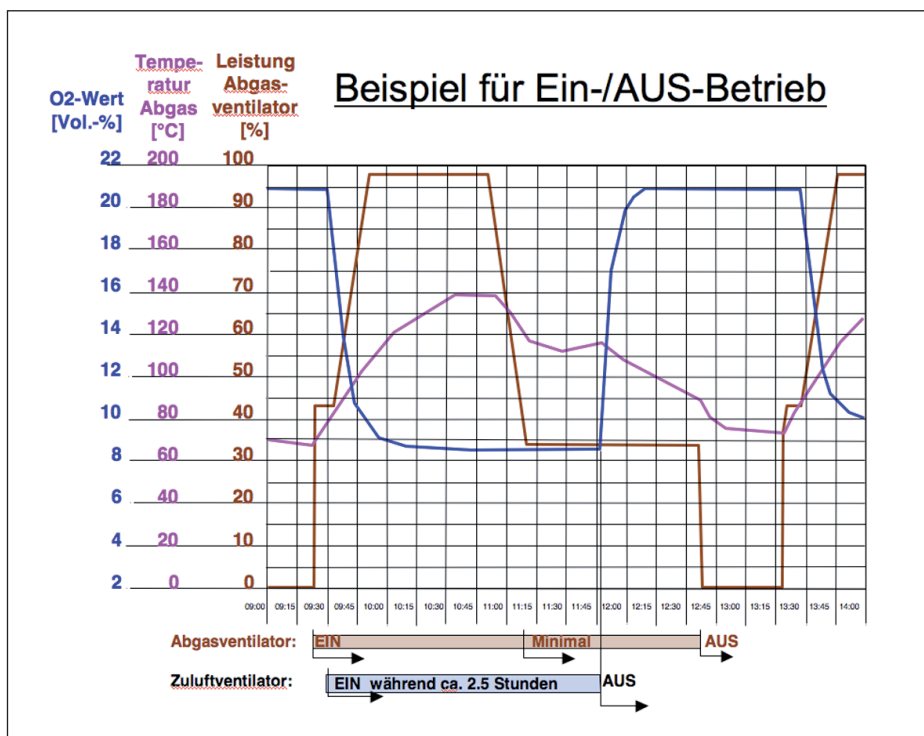
eine Kontrolle der LRV sicherzustellen, dass künftige Anlagen nicht nur optimal geplant, sondern auch korrekt betrieben werden.

### Zielsetzung

Je nach Interpretation kann aus den beschriebenen Artikeln die Forderung nach einer kontinuierlichen Überwachung der Reingaskonzentration an Staub und einer Bezugsgrösse (in der Regel der Sauerstoffgehalt) abgeleitet werden. Für Kehrichtverbrennungsanlagen oder Kraftwerke ist eine solche Überwachung üblich und verhältnismässig, für kleine und mittlere Anlagen kann sie jedoch prohibitive Kosten verursachen. Aus diesem Grund sollte für den Vollzug der LRV eine Lösung gefunden werden, die den Anliegen der Luftreinhaltung Rechnung trägt, also eine Reduktion der Feinstaubemissionen aus der betrachteten Anlagenkategorie in der Praxis sicherstellt, ohne jedoch eine vermehrte Nutzung der Holzenergie in dieser wichtigen Kategorie von Holzfeuerungen zu verunmöglichen. Gleichzeitig ist anzustreben, dass der LRV-Vollzug in allen Kantonen einheitlich erfolgt. Kantonal unterschiedliche Regelungen hätten negative Auswirkungen auf die Luftreinhaltung und würden gleichzeitig eine optimale Nutzung der Holzenergie behindern.

### Vereinfachte Kontrolle

Die verschiedenen Bedingungen der LRV begrenzen die von einer Verbrennungsanlage pro Stunde, pro Tag und pro Jahr zulässigen Schadstoffemissionen (Konzentrationen). Als Basis für eine Vereinfachung wird vorgeschlagen, die Einhaltung der jährlich maximal zulässigen Emissionsfracht als prioritär zu bewerten. Zu Gunsten einer Vereinfachung wird deshalb vom Modell ausgegangen, dass die Emissionsgrenzwerte im Sinne einer Limitierung der Jahresfracht interpretiert werden, während auf die Stunden- und Tagesmittelwerte zu Gunsten der Verhältnismässigkeit verzichtet wird. Anstelle der Jahresfracht kann vereinfachend auch der Mittelwert des Staubgehalts während eines Jahres ausgewiesen werden. Mit diesen Annahmen kann für die verschiedenen in der LRV festgelegten Anforderungen eine Ersatzanforderung abgeleitet werden. Zu deren Nachweis ist eine periodische Messung des Staubgehalts im Reingas und im Rohgas sowie die Erfassung weniger Betriebsdaten erforderlich. Optional ist für eine höhere Aussagekraft bei der Erhebung der Daten zwischen Volllast- und Teillastbetrieb zu unterscheiden. Je nach Anlagengrösse und -komplexität können zudem noch



Grafik 3: Beispiel des Verlaufs eines einzelnen Ein/Aus-Zyklus einer automatischen Holzfeuerung [1].

spezifische Eigenheiten berücksichtigt werden. Damit können mit abnehmendem Kontrollaufwand insgesamt vier Varianten unterschieden werden, wobei Variante 1 die Maximalvariante mit kontinuierlicher Staubmessung beschreibt, für die häufigsten Anwendungen jedoch ein Vollzug nach Variante 2 bis 4 vorgeschlagen wird [1]. Für diese vereinfachten Varianten sind eine periodische Staubmessung im Roh- und Reingas notwendig sowie zusätzlich die kontinuierliche Erfassung ausgewählter Betriebsgrößen oder im einfachsten Fall der Betriebsstunden von Abscheider und Feuerung.

Da die Einzelanforderungen der LRV allein über den Nachweis der Jahresfracht nicht gewährleistet sind, wird vorgeschlagen, die Einhaltung der Einzelanforderungen zwar im Grundsatz zu verlangen, jedoch deren Nachweis nur in besonderen Situationen oder in Klagefällen zu fordern. Als Regelfall ist dagegen der Nachweis der Einhaltung der Jahresfracht mit einem vereinfachten Mittelwert des Staubgehalts oder einer aus den Emissionswerten im Roh- und Reingas abgeleiteten Mindestverfügbarkeit zu verlangen. Die Methode basiert somit auf der vereinfachenden Annahme, dass die Staubemissionen im Roh- und Reingas im regulären Betrieb nicht wesentlich von den während der Kontrollmessung erzielten Werten abweichen. Wenn somit signifikant veränderte Bedingungen eintreten und zum Beispiel bei Wechsel des Brennstoffsortiments deutlich höhere Emissionswerte zu erwarten sind, müsste eine zwischenzeitliche Kontrolle stattfinden. Für den Fall eines Betriebs der Holzfeuerung bei Volllast und ohne Glutbettunterhalt kann der vereinfachte Nachweis mit folgenden Messungen und Berechnungen erfolgen:

#### a) Bestimmung des Staubgehalts

Bestimmung des mittleren Staubgehalts über ein Jahr:

$$\bar{c} = \frac{t_A \cdot c_{\text{Reingas}} + (t_f - t_A) \cdot c_{\text{Rohgas}}}{t_f} \quad [\text{mg}/\text{m}_n^3] \quad (1)$$

$\bar{c}$  = Mittelwert des Staubgehalts  $[\text{mg}/\text{m}_n^3]$

$t_A$  = Zeit während Abscheider EIN  $[\text{h}/\text{a}]$

$t_f$  = Zeit während Feuerung EIN  $[\text{h}/\text{a}]$

$c_{\text{Reingas}}$  = Staubgehalt im Reingas (z.B. alle zwei Jahre gemessen)  $[\text{mg}/\text{m}_n^3]$

$c_{\text{Rohgas}}$  = Staubgehalt im Rohgas (z.B. alle zwei Jahre gemessen)  $[\text{mg}/\text{m}_n^3]$

Alle Emissionswerte sind bei der gleichen Bezugsgrösse von 13 Vol.-%  $\text{O}_2$  oder von 11 Vol.-%  $\text{O}_2$  auszuweisen.

Zu erfüllende Ersatzanforderung:

$$\bar{c} \leq c_{\text{Grenzwert}} \quad [\text{mg}/\text{m}_n^3] \quad (2)$$

$c_{\text{Grenzwert}}$  = Grenzwert für den Staubgehalt nach LRV  $[\text{mg}/\text{m}_n^3]$

Sofern die Anlage über einen Betrieb mit Glutbettunterhalt und bei Teillast verfügt, sind diese Phasen für eine aussagekräftige Beurteilung zusätzlich separat zu erfassen. Die Anwendung der Methode ist in [1] anhand von fiktiven Beispielen beschrieben, wobei nebst einer einfachen Auswertung mit den hier abgebildeten Gleichungen eine detaillierte Auswertung in einer Tabellenkalkulation beschrieben ist, wie sie für reale Anwendungen mit Teillast und Glutbettunterhalt empfohlen wird.

#### b) Bestimmung der Verfügbarkeit

Im Falle eines reinen Volllastbetriebs kann die Ersatzanforderung auch mit Einführung der zeitlichen Verfügbarkeit wie folgt formuliert werden:

$$v = 100 \cdot \frac{t_A}{t_f} \quad [\%] \quad (3)$$

$v$  = Zeitliche Verfügbarkeit  $[\%]$

Mindest-Verfügbarkeit des Feinstaubabscheiders:

$$v_{\text{min}} = 100 \cdot \frac{c_{\text{Rohgas}} - c_{\text{Grenzwert}}}{c_{\text{Rohgas}} - c_{\text{Reingas}}} \quad [\%] \quad (4)$$

$v_{\text{min}}$  = Minimale zeitliche Verfügbarkeit zur Einhaltung des Staubgrenzwerts  $[\%]$

Daraus abgeleitete Anforderung:

$$v \geq v_{\text{min}} \quad (5)$$

Die Verfügbarkeit dient dabei lediglich als anschauliche Hilfsgrösse, bei der allerdings zu beachten ist, dass die Anforderung gemäss Gleichung 4 die Kenntnis des Roh- und Reingaskontakts voraussetzt und dass die zu erfüllende Mindest-Verfügbarkeit weder aus der LRV hervorgeht, noch mit den in der LRV aufgeführten Zahlenwerten nach Artikel 15 in Zusammenhang steht. Bei einer Berücksichtigung von Glutbettunterhalt und Teillast wird die Bestimmung der Verfügbarkeit aufwändig, weshalb empfohlen wird, den Nachweis über die Erfüllung der LRV über den mittleren Staubgehalt nach

Auswertung a) vorzunehmen und die Verfügbarkeit nur als illustrierende Hilfsgrösse zu verwenden.

#### Ausblick

Da die vorgestellte Methode bis anhin noch nicht in der Praxis eingesetzt wurde, wird empfohlen, das Vorgehen vor einer breiten Einführung in der Praxis zu testen und die getroffenen Annahmen zu prüfen und gegebenenfalls anzupassen. Zudem wird empfohlen, das Modell zur Berücksichtigung einer Unterscheidung von Volllast und Teillast zu ergänzen und einen Ansatz zur Erfassung von Anlagen mit Verwendung von einem Feinstaubabscheider für mehrere Feuerungen zu entwerfen. ●

#### Literatur

- [1] Good, J., Nussbaumer, Th.: Überwachung und Vollzug der LRV für Holzheizungen ab 500 kW mit Feinstaubabscheidern im Kanton Zürich, 10. Holzenergie-Symposium, 12. September 2008, ETH Zürich, 2008, ISBN 3-908705-19-3, 219–256
- [2] Luftreinhalte-Verordnung (LRV) vom 16. Dezember 1985 (Stand am 1. September 2007), Artikel 814.318.142.1. Der Schweizerische Bundesrat, Bern 2007
- [3] Nussbaumer, Th.: Abgasreinigung und -kondensation, in M. Kaltschmitt und H. Hartmann (Hrsg.): Energie aus Biomasse, Springer, ISBN 3-540-64853-42001, Berlin u.a. 2001, 374–389
- [4] Nussbaumer, Th.: Feinstaubabscheider für automatische Holzfeuerungen, HK Gebäudetechnik, 9 (2006), 24–31
- [5] Jirkowsky, C., Pretzl, R., Malzer, Th., Sihorsch, K.: Verfahren zur Staubabscheidung bei Biomasse-feuerungen ab 100 kW, 7. Holzenergie-Symposium, 18. Oktober 2002, Zürich, ISBN 3-908705-01-0, 53–72
- [6] Bär, R.: Praxiserfahrungen mit elektrischen Abscheidern für Holzfeuerungen ab 200 kW, 9. Holzenergie-Symposium, 20. Oktober 2006, Zürich, ISBN 3-908705-14-2, 63–70
- [7] Baumgartner, M.: Abgaskondensation zur Wirkungsgraderhöhung und Feinstaubabscheidung ab 100 kW und Kombination mit Nasselektroabscheidung ab 1 MW, 10. Holzenergie-Symposium, 12. September 2008, ETH Zürich, 2008, ISBN 3-908705-19-3, 205–218
- [8] QM Holzheizwerke (J. Good, et al.): Planungshandbuch, Band 4 der Schriftenreihe QM Holzheizwerke, C.A.R.M.E.N. e.V., Straubing 2004, ISBN 3-937441-94-8