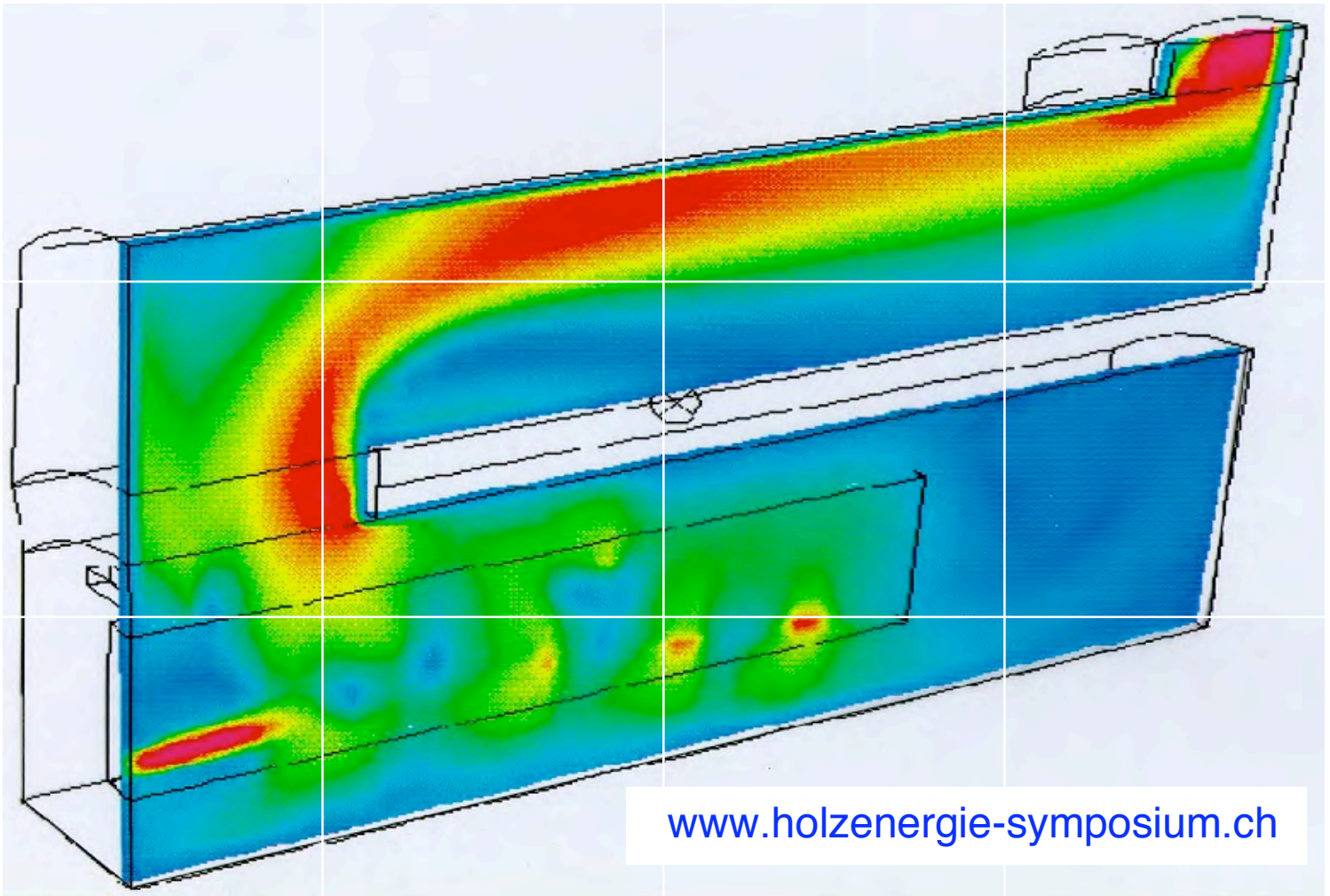


Thomas Nussbaumer (Hrsg.)

10. Holzenergie-Symposium

Ökonomie, Technik und Luftreinhaltung

12. September 2008, ETH Zürich



Thomas Nussbaumer (Hrsg.):

Ökonomie, Technik und Luftreinhaltung. Tagungsband zum 10. Holzenergie-Symposium, 12. September 2008 an der ETH Zürich, Verenum Zürich 2008

ISBN 3-908705-19-3

Bezugsquellen:

Holzenergie-Symposium, c/o TEMAS AG, Egnacherstrasse 69, CH – 9320 Arbon
Telefon 071 446 50 30, Fax 071 446 50 82, Email info@holzenergie-symposium.ch

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

Weitere Informationen: www.holzenergie-symposium.ch

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	4
1 M. Kaufmann: Förderung von Energieeffizienz und erneuerbaren Energien durch den Bund: Aktionspläne, KEV und Klimarappen	7
2 Th. Schmid: Holzenergie-Förderung durch die Stiftung Klimarappen: Möglichkeiten und Beitrag der Holzenergie	17
3 E. Jochem, F. Reitze, L. Riffeser: Nachhaltige Energiesysteme durch Effizienz und erneuerbare Energien	31
4 P. Schmid: Holzkraftwerk Basel: Technik, Wirtschaftlichkeit und Holzversorgung	43
5 M. Schaub, H. Gemperle: 1,2 MWe Holzheizkraftwerk Stans mit Festbettvergasung	53
6 M. Schmid: Holzbefeuertes Blockheizkraftwerk mit Heissluftturbine: Demonstrationsanlage in Rümlang mit 450 kWt und 100 kWe	65
7 G. Friedl, W. Moser, S. Griesmayr: Pelletfeuerungen mit thermoelektrischer Stromerzeugung	77
8 M. Baillifard, Th. Nussbaumer: Strömungsoptimierung von Feuerräumen mittels Experiment und Computational Fluid Dynamics (CFD)	93
9 R. Rapp: Eigenschaften und Gesundheitswirkungen von Feinstaub	115
10 Th. Nussbaumer: Feinstaub-Emissionsfaktoren von Holzheizungen: Übersicht aus Ländern der Internationalen Energie Agentur	129
11 V. Schmatloch: Integrierte und nachgeschaltete Elektroabscheider für Holzöfen	157
12 T. Brzović: Oekotube: Elektroabscheider als Kaminaufsatz für kleine Holzheizungen	171
13 Th. Bleul: Elektroabscheider für Biomasse-Heisanlagen von 0 kW bis 150 kW	181
14 R. Bolliger: Elektroabscheider „Spider“ für Holzfeuerungen bis 70 kW	185
15 M. Scheibler, P. Oberforcher: Metallgewebefilter für automatische Anlagen von 100 kW bis 540 kW	191
16 M. Baumgartner: Abgaskondensation zur Wirkungsgraderhöhung und Feinstaubabscheidung ab 100 kW und Kombination mit Nasselektroabscheidung ab 1 MW	205
17 J. Good, Th. Nussbaumer: Überwachung und Vollzug der LRV für Holzheizungen ab 500 kW mit Feinstaubabscheidern im Kanton Zürich	219
Autorenverzeichnis	257

Überwachung und Vollzug der LRV für Holzheizungen ab 500 kW mit Feinstaubabscheidern im Kanton Zürich

Jürgen Good und Thomas Nussbaumer, Verenum, Zürich

Zusammenfassung

Die Überarbeitung der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) im Jahr 2007 hat für Holzfeuerungen weitreichende Konsequenzen. Unter anderem wird für Anlagen ab 500 kW der Einsatz von Feinstaubabscheidern zwar nicht vorgeschrieben, jedoch aufgrund des tiefen Grenzwerts in der Praxis nahezu unumgänglich. Damit stellt sich in naher Zukunft für eine grosse Zahl kleiner und mittlerer Anlagen die Frage, wie die verschiedenen Bestimmungen der LRV bei einem Einsatz von Feinstaubabscheidern zu interpretieren und in der Praxis zu vollziehen sind. Dabei gilt es, einerseits den Anliegen der Luftreinhaltung Rechnung zu tragen und die angestrebte Reduktion der Feinstaubemissionen aus der betrachteten Anlagenkategorie in der Praxis tatsächlich sicher zu stellen. Andererseits kann eine flächendeckende Einführung einer kontinuierlichen Überwachung der Feinstaubemissionen im Reingas nach Feinstaubabscheidern zu prohibitiven Kosten führen und eine vermehrte Nutzung der Holzenergie behindern, was nicht im Sinn der Sache liegt.

Im Beitrag wird die Ausgangslage der in der LRV aufgeführten und für Feinstaubabscheider potenziell relevanten Artikel beschrieben und kommentiert. Eine abschliessende Interpretation kann an dieser Stelle nicht gemacht werden, sondern ist Aufgabe der Vollzugsbehörden, also der Kantone. Allerdings ist anzustreben, dass die LRV in der Schweiz einheitlich vollzogen wird und nicht kantonale unterschiedliche Interpretationen zur Anwendung kommen. Im Beitrag wird deshalb ein Vorschlag gemacht, wie die Ausführungen angewendet werden können. Dabei wird vom Modell ausgegangen, dass die Emissionsbegrenzung im Sinne einer Begrenzung der Jahresfracht interpretiert wird. Auf dieser Basis kann eine einzelne Ersatzanforderung anstelle der zahlreichen in der LRV festgelegten Einzelanforderungen abgeleitet werden. Für diese Einzelanforderung wird anhand eines fiktiven Beispiels aufgezeigt, dass eine Überwachung durch Erfassung weniger Betriebsdaten sowie einer regelmässigen Abnahmemessung mit Ermittlung des Staubgehalts im Roh- und Reingas ersetzt werden kann. Ein Vollzug auf dem vorgestellten Modell oder in ähnlicher Form ist potenziell in der Lage, sowohl die Anliegen der Luftreinhaltung sicher zu stellen als auch den Vollzugaufwand auf ein verträgliches Mass zu begrenzen. Da der vorgestellte Vorschlag auf einem fiktiven Beispiel beruht, jede Anlage spezifische Eigenheiten aufweist und zudem zur Überwachung mit dem vorgestellten Vorschlag keine Erfahrungen vorliegen, wird als vordringlich erachtet, dass ein Verfahren in der vorgestellten Form probenhalber eingeführt und durch eine Erfolgskontrolle validiert wird. Auf dieser Basis ist im Weiteren eine für die ganze Schweiz einheitliche Überwachungs-Strategie anzustreben.

1 Ausgangslage

Die Verschärfung der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) zur Verminderung der Feinstaubemissionen beinhaltet unter anderem deutlich tiefere Emissionsgrenzwerte für automatische Holzfeuerungen [LRV 2007]. Diese machen vorerst für Neuanlagen und nach einer Übergangsfrist auch für bestehende Anlagen in der Regel für Anlagen mit einer Feuerungsleistung ab 500 kW Feinstaubabscheider erforderlich, da diese einen Staubgrenzwert von 20 mg/m_n^3 bei 13 Vol.-% O_2 einhalten müssen. Je nach Brennstoff und Anlagenart können auch Anlagen unter 500 kW betroffen sein, da diese einen Staubgrenzwert von 50 mg/m_n^3 bei 13 Vol.-% O_2 einhaltenmüssen. Durch diese Neuerung stellt sich für eine grosse Zahl von Anlagen die Frage, wie die LRV zu interpretieren ist, da zahlreiche Einzelausführungen der LRV zum Tragen kommen. Im Weiteren stellt sich die Frage, wie die LRV unter Wahrung der Verhältnismässigkeit der Kosten in der Praxis zu kontrollieren und zu vollziehen ist.

Der vorliegende Beitrag hat zum Ziel, die Ausführungen der LRV zur Überwachung der Emissionsgrenzwerte zu analysieren und mögliche Interpretationen für deren Umsetzung bei automatischen Holzfeuerungen mit Feinstaubabscheidern zu diskutieren. Da der Betrieb von Feinstaubabscheidern massgeblich durch den Betrieb der Feuerung bestimmt wird, und da über den Betrieb von Feinstaubabscheidern bei automatischen Holzfeuerungen unter 1 MW kaum Erfahrungen aus der Praxis vorliegen, sollen vorab typische Betriebsarten entsprechender Feuerungen beschrieben und daraus die zu erwartenden Konsequenzen für die Feinstaubabscheider aufgezeigt werden. Auf Basis der Betriebsweise entsprechender Anlagen sollen Varianten zum Vollzug der LRV aufgezeigt und in Bezug auf die Anwendbarkeit in der Praxis verglichen werden. Schliesslich soll beschrieben werden, welche offenen Fragen für einen praktikablen Vollzug noch bestehen und wie diese mit weiterführenden Abklärungen beantwortet werden können.

2 Vorgaben der Luftreinhalte-Verordnung

2.1 LRV Art. 13 Emissionsmessungen und -kontrollen

Die thematisch relevanten Vorgaben der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) werden nachfolgend aufgelistet [LRV 2007]. Die im Zusammenhang mit der Kontrolle von Feinstaubabscheidern bei Holzfeuerungen Randbedingungen und offenen Fragen sind dabei hervorgehoben und kommentiert.

<p>Art. 13 Emissionsmessungen und -kontrollen</p> <p>¹ Die Behörde überwacht die Einhaltung der Emissionsbegrenzungen. Sie führt selber Emissionsmessungen oder -kontrollen durch oder lässt solche durchführen.</p> <p>² Die erste Messung oder Kontrolle soll wenn möglich innert drei, spätestens jedoch innert zwölf Monaten nach der Inbetriebnahme der neuen oder sanierten Anlage erfolgen.</p> <p>³ In der Regel ist die <u>Messung oder Kontrolle bei Feuerungen alle zwei Jahre</u>, bei den übrigen Anlagen alle drei Jahre zu wiederholen.⁹ Vorbehalten bleiben abweichende Bestimmungen in den Anhängen 2 und 3.¹⁰</p> <p>⁴ Bei Anlagen, aus denen <u>erhebliche Emissionen austreten können</u>, ordnet die Behörde die <u>kontinuierliche Messung und Aufzeichnung der Emissionen oder einer anderen Betriebsgrösse an, welche die Kontrolle der Emissionen ermöglicht</u>.</p>	<p>Anmerkungen:</p> <p>1. <u>Messung alle zwei Jahre</u></p> <p>2. <u>Interpretation erheblich</u></p> <p>3. <u>Kontinuierliche Messung</u></p>
---	---

Interpretation und Anmerkungen

1. Messung alle zwei Jahre: Da die Emissionsbegrenzung überwacht wird, müssen nur Rein-gaswerte gemessen werden, Rohgasemissionen jedoch nicht.

2. Interpretation erheblich? Hier liegt Interpretationsspielraum vor, der durch die Behörde noch präzisiert werden sollte. Bei Ausfall oder Umgehung von effizienten Feinstaubabscheidern mit Abscheidegraden von über 90% sind die Emissionen um mehr als einen Faktor 10 erhöht. Sofern dies als erheblich angenommen wird, muss die Behörde eine kontinuierliche Überwachung anordnen.

3. Kontinuierliche Messung muss angeordnet werden. Dies können Emissionen oder andere Betriebsgrössen sein, die eine Kontrolle der Emissionen ermöglicht.

2.2 LRV Art. 14 Durchführung der Messungen

<p>Art. 14 Durchführung der Messungen</p> <p>¹ Die Messungen müssen die für die <u>Beurteilung wichtigen Betriebszustände</u> erfassen. Wenn nötig legt die Behörde Art und Umfang der Messung sowie die zu erfassenden Betriebszustände fest.</p> <p>² Emissionsmessungen sind nach den anerkannten Regeln der Messtechnik durchzuführen. Das Bundesamt für Umwelt¹¹ (Bundesamt) empfiehlt geeignete Messverfahren.¹²</p> <p>³ Der Inhaber der zu überprüfenden Anlage muss nach Anweisung der Behörde geeignete Messplätze einrichten und zugänglich machen.</p> <p>⁴ Die gemessenen und errechneten Werte, die verwendeten Messverfahren und die Betriebsbedingungen der Anlage während der Messungen müssen in einem Messbericht festgehalten werden.</p>	<p>4. Interpretation wichtige Betriebszustände?</p>
--	---

Interpretation und Anmerkungen

4. Interpretation wichtige Betriebszustände: Betriebszustände, die emissionsrelevant sind und häufig vorkommen, sollten als wichtig eingestuft werden. Dies ist bei sämtlichen Feinstaubabscheidern sicherlich die Abreinigung des Abscheiders. Bei als Heizanlagen betriebenen Holzfeuerungen ist es zudem das Anfahren der Anlage, das Abfahren der Anlage, der Teillastbetrieb sowie sehr oft auch der Ein-/Aus-Betrieb, weil diese Betriebsarten oft vorkommen und emissionsrelevant sind.

2.3 LRV Art. 15 Beurteilung der Emissionen

<p>Art. 15 Beurteilung der Emissionen</p> <p>¹ Die gemessenen Werte sind auf die in Anhang 1 Ziffer 23 festgelegten Bezugsgrößen umzurechnen.</p> <p>² Soweit die Anhänge 1–4 nichts anderes bestimmen, sind die nach Absatz 1 errechneten Werte für die <u>Beurteilung über den Zeitraum einer Stunde zu mitteln</u>. Die Behörde kann in begründeten Fällen andere geeignete Mittelungszeiten festlegen.</p> <p>³ Bei Abnahme- und Kontrollmessungen gelten die Emissionsbegrenzungen als eingehalten, wenn keiner der nach Absatz 2 bestimmten Mittelwerte den Grenzwert überschreitet.</p> <p>⁴ Bei kontinuierlicher Messung der Emissionen gelten die Emissionsgrenzwerte als eingehalten, wenn innerhalb des Kalenderjahres:</p> <ol style="list-style-type: none">keiner der Tagesmittelwerte den Emissionsgrenzwert überschreitet;97 Prozent aller Stundenmittelwerte das 1,2-fache des Grenzwertes nicht überschreiten undkeiner der Stundenmittelwerte das Zweifache des Grenzwertes überschreitet. <p>⁵ <u>Die Emissionen während der An- und Abfahrzeiten der Anlage</u> werden von der Behörde unter Berücksichtigung der besonderen Umstände beurteilt.</p>	<p>5. Normierung erforderlich</p> <p>6. Stundenmittelwerte müssen bestimmt werden</p> <p>7. Wenn kontinuierlich gemessen: Stunden- und Tagesmittelwerte müssen bestimmt und ganzes Jahr dokumentiert werden.</p> <p>8. An- und Abfahren muss beurteilt werden, <u>wie</u> wird offen gelassen.</p>
---	--

2.4 LRV Anhang 3 Ziffer 522 Emissionsgrenzwerte

522 Emissionsgrenzwerte

¹ Die Emissionen von Feuerungen, die mit Holzbrennstoffen nach Anhang 5 Ziffer 3 Absatz 1 betrieben werden, dürfen folgende Werte nicht überschreiten:

		Feuerungswärmeleistung				
		bis 70 kW	über 70 kW bis 500 kW	über 500 kW bis 1 MW	über 1 MW bis 10 MW	über 10 MW
<i>Holzbrennstoffe</i>						
- Bezugsgrösse: Die Grenzwerte beziehen sich auf einen Sauerstoffgehalt im Abgas von	%vol	13	13	13	11	11
- Feststoffe insgesamt:						
- ab 1. September 2007	mg/m ³	-	150	150	20	10
- ab 1. Januar 2008	mg/m ³	-	150	20	20	10
- ab 1. Januar 2012	mg/m ³	-	50 ¹	20	20	10
- Kohlenmonoxid (CO):						
- für Holzbrennstoffe nach Anh. 5 Ziff. 3 Abs. 1 Bst. a und b						
- ab 1. September 2007	mg/m ³	4000 ²	1000	500	250	150
- ab 1. Januar 2012	mg/m ³	4000 ²	500	500	250	150
- für Holzbrennstoffe nach Anh. 5 Ziff. 3 Abs. 1 Bst. c						
- ab 1. September 2007	mg/m ³	1000	1000	500	250	150
- ab 1. Januar 2012	mg/m ³	1000	500	500	250	150
- Stickoxide (NO _x) angegeben als Stickstoffdioxid (NO ₂)	mg/m ³	3	3	3	3	150
- gasförmige organische Stoffe, ange- geben als Gesamtkohlenstoff (C)	mg/m ³	-	-	-	-	50
- Ammoniak und Ammoniumverbin- dungen, angegeben als Ammoniak ⁴	mg/m ³	-	-	-	30	30

Hinweise:

- Die Angabe eines Strichs in der Tabelle bedeutet, dass weder nach Anhang 3 noch nach Anhang 1 eine Begrenzung vorgeschrieben ist.
- ¹ Feststoff-Grenzwert für handbeschickte Stückholzkessel für Holzbrennstoffe nach Anhang 5 Ziffer 3 Absatz 1 Buchstabe a mit einer Feuerungswärmeleistung bis 120 kW: 100 mg/m³.
- ² Gilt nicht für Zentralheizungsherde.
- ³ Siehe Stickoxid-Grenzwert Anhang 1 Ziffer 6.
- ⁴ Diese Emissionsbegrenzung ist nur für Feuerungsanlagen mit Entstickungseinrichtung von Bedeutung.

² Vorbehalten bleiben die besonderen Anforderungen an neue handbeschickte Feuerungen nach Ziffer 523.

³ Die Behörde legt die vorsorglichen Emissionsbegrenzungen für Chlorverbindungen und für organische gas-, dampf-, oder partikelförmige Stoffe nach Artikel 4 fest; die Emissionsbegrenzungen für Chlorverbindungen nach Anhang 1 Ziffer 6 sowie die Emissionsbegrenzungen für organische Stoffe nach Anhang 1 Ziffer 7 gelten nicht.

2.5 LRV Anhang 3 Ziffer 524 Messung und Kontrolle

524 Messung und Kontrolle

¹ Bei Feuerungen mit einer Feuerungswärmeleistung bis 70 kW gilt der Emissionsgrenzwert für Kohlenmonoxid in der Regel als eingehalten, wenn feststeht, dass die Anlage fachgerecht betrieben und ausschliesslich naturbelassenes Holz nach Anhang 5 Ziffer 3 Absatz 1 Buchstaben a und b verbrannt wird. Steht fest oder ist zu erwarten, dass Rauchemissionen oder Geruchsimmissionen auftreten, kann die Behörde Emissionsmessungen oder weitere Untersuchungen veranlassen.

² Für die Beurteilung massgebend sind die mittleren Emissionen über den Zeitraum einer halben Stunde. Das Bundesamt empfiehlt geeignete Mess- und Beurteilungsverfahren.

3 Betriebsverhalten automatischer Holzfeuerungen

3.1 Einflussparameter

Ein emissionsarmer Betrieb von automatischen Holzfeuerungen mit hohem Wirkungsgrad setzt einen gleichmässigen Leistungsverlauf mit wenig EIN/AUS-Zyklen und wenig Standby-Phasen voraus. Die folgenden Parameter haben einen bedeutenden Einfluss auf das Betriebsverhalten:

- Art des Wärmebedarfs: Raumwärme / Warmwasser / Prozesswärme / Wärmekraftkopplung
- Holzkessel: Winterbetrieb / Winter- und Sommerbetrieb
- Systemwahl: monovalent – bivalent
- Systemwahl: ohne Speicher – mit Speicher (und geeigneter Speicherladeregelung)
- Anlagendimensionierung: Leistungsaufteilung Holzkessel/Bivalentkessel – Leistungsregelbereich des Holzkessels
- Feuerungssystem: Unterschubfeuerung – Rostfeuerung
- Brennstoff: Stückigkeit – Wassergehalt – Ascheanteil – Fremtteile – Aufbereitungsart – Lagerung
- Bei niedrigem Leistungsbedarf: Glutbettunterhalt – automatische Zündung – optimierte Regelung des Anfahr- und Ausbrandvorgangs
- Betriebsoptimierung: im ersten Betriebsjahr und danach bei Wechsel des Sortiments.

Der **zeitliche Verlauf des Wärmeleistungsbedarfs** wird durch die Nutzungsart der Wärme vorgegeben. Während Raumwärmebedarf von der Witterung abhängig ist, wird der Bedarf an Warmwasser (Brauchwarmwasser) vom Verhalten der Nutzer beeinflusst. Prozesswärme ist in der Regel an gewerbliche oder industrielle Prozesse gekoppelt. Sie kann sehr regelmässig als Bandlast anfallen, was für den Betrieb einer Holzfeuerung ideal ist, es gibt aber auch Anwendungen von Prozesswärme mit zeitlich unregelmässigem Bedarf und kurzen Spitzen, was für die Heizanlage unvorteilhaft ist und zur Abdeckung mit einer Holzfeuerung in der Regel den Einsatz eines Wärmespeichers voraussetzt.

Die **Systemwahl** und die **Anlagendimensionierung** beeinflussen die Auslastung einer Holzfeuerung. Bei bivalenter Betriebsweise wird der Holzkessel in der Regel auf 50% bis 70% des Wärmeleistungsbedarfs ausgelegt. Ein technischer Speicher soll so dimensioniert sein, dass er die während einer Stunde bei Nennleistung des Holzkessels produzierte Wärme speichern kann. Mit geeigneter Speicherladeregelung verringert er die EIN/AUS-Zyklen und die Standby-Phasen.

Das **Feuerungssystem** muss auf die Art des Wärmeleistungsbedarfs und auf den verwendeten **Brennstoff** abgestimmt sein. So sind Rostfeuerungen auch für Brennstoffe mit hohem Wassergehalt (bis 60%) und hohem Anteil an Rinde geeignet, jedoch gleichzeitig schlecht geeignet für Teillast- und ungeeignet für Schwachlastbetrieb. Unterschubfeuerungen sind dagegen besser geeignet für Teillast- und Schwachlastbetrieb sowie für Brennstoffe mit hohem

Feinanteil (Staubanteil bis 50% bei einem Wassergehalt < 20%), dagegen ist jedoch der Wassergehalt stärker eingeschränkt als bei Rostfeuerungen.

Eine **Betriebsoptimierung** soll im ersten Betriebsjahr einer automatischen Holzfeuerung erfolgen. In den folgenden Betriebsjahren soll zumindest bei jeder Änderung des Brennstofftyps eine Optimierung der Betriebseinstellungen vorgenommen werden.

Für **Neuanlagen** wird empfohlen, das Qualitäts-Management **QM Holzheizwerke®** anzuwenden, bei dem die Anlagen während der Planungsphase und bis zum Abschluss der Betriebsoptimierung begleitet werden [QM Holzheizwerke]. Das QM ist für Anlagen ab einem Wärmeleistungsbedarf von 100 kW vorgesehen, wobei für Anlagen mit Wärmenetz bis 250 kW sowie für Anlagen ohne Wärmenetz bis 500 kW ein vereinfachtes Verfahren angewendet werden kann.

Beispiel zu Systemwahl und Anlagendimensionierung:

In einem fiktiven Beispiel einer bivalenten Heizanlage mit Ganzjahresbetrieb für Raumwärme und Warmwasser nach Tabelle 1 werden die Kriterien zur Systemwahl und Anlagendimensionierung beurteilt. Der mittlere Wärmeleistungsbedarf eines Nahwärmenetzes betrage rund 500 kW. Die Wärmeerzeugung erfolge bivalent mit Speicher. Der Holzkessel (Unterschubfeuerung) wird auf ca. 300 kW bzw. rund 60% des Wärmeleistungsbedarfs ausgelegt. Er kann die Leistung bis auf 20% reduzieren, sofern bei Schwachlastbetrieb trockener Brennstoff verwendet wird. Damit kann der Holzkessel auch im Sommerbetrieb eingesetzt werden und erbringt insgesamt rund 86 % der jährlichen Wärmeproduktion. Es ist somit ein qualitativ gutes Betriebsverhalten der Holzfeuerung zu erwarten.

Tabelle 1 Qualitative Bewertung des Betriebsverhaltens einer Wärmeerzeugungsanlage mit Holzfeuerung für verschiedene Einsatzarten. Legende:

RW: Raumwärme, WW: Brauchwarmwasser, PW: Prozesswärme, w = Wassergehalt

Voraussetzung für guten Betrieb:

++ sehr gut, + gut, 0 neutral, – schlecht, – – sehr schlecht

Parameter	Parameter	Parameter	Betriebsverhalten	Kriterien, Kenngrößen
Wärmeleistungsbedarf	Heizsaison	RW	0	
		RW + WW	+	
		RW + WW + PW	++	
	Sommer	WW	–	Holzkessel: 12 h Laufzeit pro Tag
		WW + PW	– / 0	
Systemwahl Wärmeerzeugung	Monovalent	Heizsaison	0	Vollbetriebsstundenzahl Holzkessel [h/a]
		Sommer	–	
	Bivalent	Aufteilung geeignet	+	Holzkessel ca. 50...70% des Wärmeleistungsbedarfs
		Aufteilung ungeeignet	–	
Systemwahl Wärmeerzeugung	Ohne Speicher	Ein-Holzkesselanlage	– –	
		Bivalent	–	
		Mehr-Holzkesselanlage	0	
	Mit Speicher	Dimensionierung ungeeignet	–	Speicherdimensionierung: 1 h bei Nennleistung des Holzkessels
		Laderegulation ungeeignet	–	
		Dimensionierung und Laderegulation geeignet	+	
Feuerungssystem	Unterschub	Wassergehalt zu hoch	– –	$w \leq 50\%$
		Ascheanteil zu hoch	–	
	Rost	Wassergehalt zu hoch	– –	$w \leq 60\%$
		Teillast und Schwachlast	–	
		Hoher Feinanteil	–	

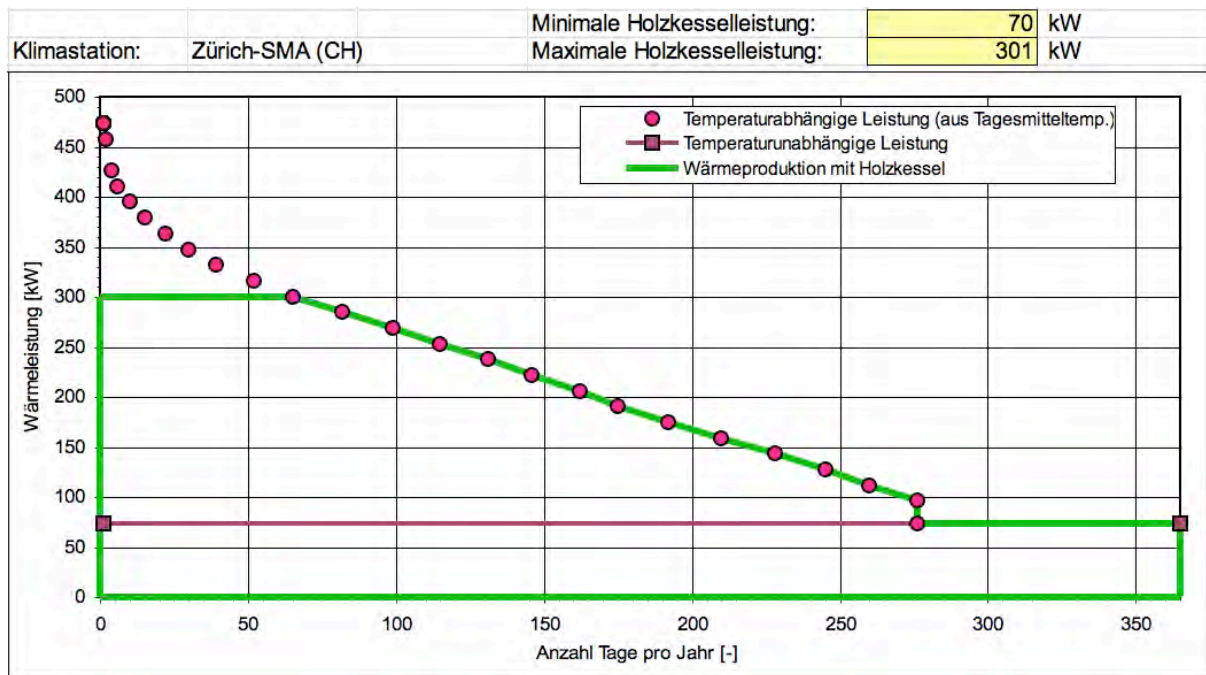


Bild 1 Jahresdauerlinie des Wärmeleistungsbedarfs eines Nahwärmenetzes. Die Grafik zeigt, an wie vielen Tagen des Jahres welche Leistung benötigt wird. So wird eine Leistung über 300 kW, ab welcher der Bivalentkessel erforderlich wird, nur an ca. 65 Tagen im Jahr benötigt.

3.2 Kriterien für gutes Betriebsverhalten

Gutes Betriebsverhalten ist zu erwarten, wenn die Feuerung während langer Phasen bei Teillast oder Volllast betrieben wird, jedoch wenig Ein-Aus-Zyklen aufweist und nicht während langer Phasen bei Schwachlast betrieben wird. Bei üblichen Anwendungen als Heizanlagen setzt dies voraus, dass aufgrund einer geeigneten Systemwahl und Anlagen-dimensionierung eine hohe zeitliche Auslastung des Holzkesseles erreicht wird. Als Kenn-grösse dazu dient die jährliche Vollbetriebsstundenzahl des Holzkesseles. Sie gibt an, wie-viele Betriebsstunden bei Nennleistung des Holzkesseles nötig wären, um die im Verlauf eines Jahres vom Holzessel produzierte Wärme zu erzeugen. Um die Vollbetriebsstundenzahl zu bestimmen, müssen zwei Grössen bekannt sein: Die vom Holzessel produzierte Wärme (gemessen mittels Wärmezähler im Holzesselkreis) und die Nennleistung des Holzkesseles. Im Q-Leitfaden von QM Holzheizwerke werden in Abhängigkeit des Wärmeleistungsbedarfs Vorgaben für die Systemwahl und entsprechend für die Vollbetriebsstundenzahl des oder der Holzessel gemacht. Ein einfaches Kriterium für gute Dimensionierung kann das Erreichen oder Überschreiten der von QM Holzheizwerke geforderten jährlichen Vollbetriebsstunden-zahl des Holzkesseles sein.

Gutes Betriebsverhalten ist weiters zu erwarten, wenn das Feuerungssystem auf die Art des Wärmebedarfs und auf den verwendeten Brennstoff abgestimmt ist. So sollten beispiels-weise Rostfeuerungen vor allem für Bandlastbetrieb eingesetzt werden. Für Schwachlast-betrieb, wie er im reinen Heizbetrieb in der Übergangszeit und im Sommer vorkommt, sind sie ungeeignet, weil sie bei niedrigem Leistungsbedarf nicht unterbruchsfrei bei weniger als 30% Leistung betrieben werden können. Ein Indiz für schlechtes Betriebsverhalten könnte somit beispielsweise sein, ob Rostfeuerungen ohne gut dimensionierten Speicher für Schwachlastbetrieb eingesetzt werden.

Daneben existieren zahlreiche weitere Kriterien, die zur Sicherstellung eines guten Anlagen-betriebs eingehalten werden müssen. Die als Beispiel genannten Kriterien allein können somit ein gutes Betriebsverhalten nicht sicher gewährleisten.

3.3 Betriebsverhalten von Holzfeuerungsanlagen in der Praxis

Betriebsverhalten im Tagesverlauf

Das folgende Beispiel in Bild 2 zeigt einen Tagesverlauf, der an einer realen 500 kW Rostfeuerung erhoben wurde. Es treten innert 24 h sechs EIN/AUS-Zyklen auf. Der zeitliche Verlauf der einzelnen Zyklen ist in etwa immer gleich, d.h. kurzer Betrieb bei Volllast, gefolgt von einem Wechsel auf Teillast und einer anschliessenden Phase bei Standby.

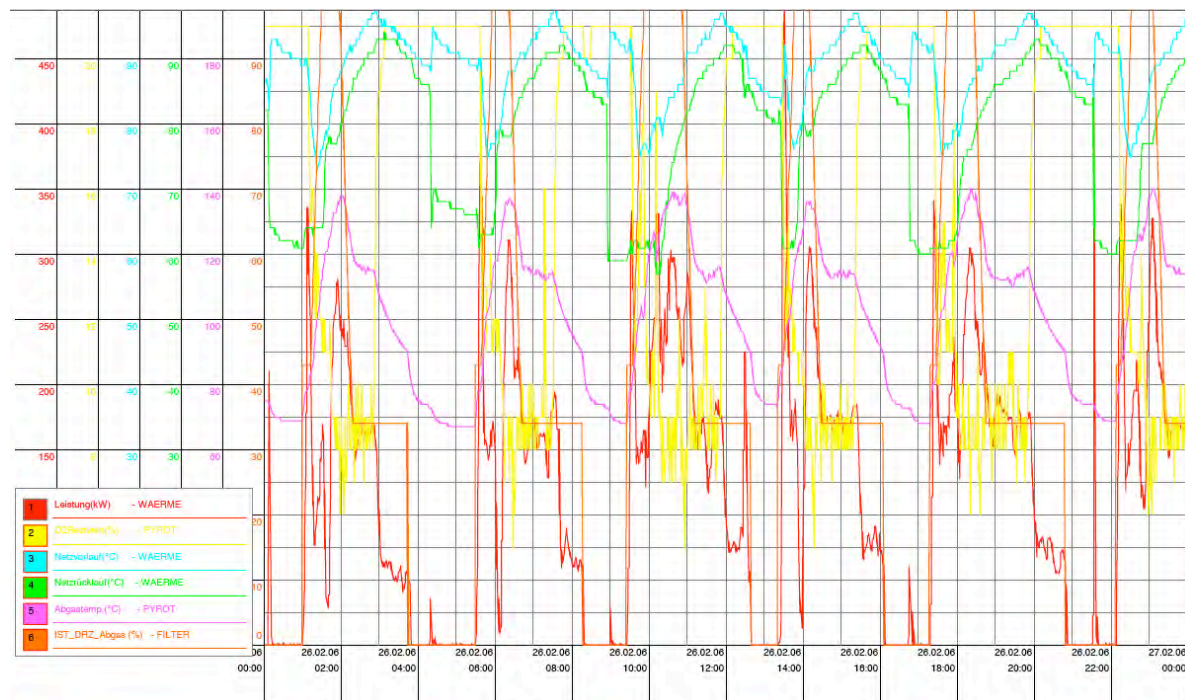


Bild 2 Beispielhafter Tagesverlauf des Betriebsverhaltens einer automatischen Holzfeuerung (Rostfeuerung).

Einzelner EIN-/AUS-Zyklus

Bild 3 zeigt einen einzelnen ausgewählten EIN/AUS-Zyklus aus dem Tagesverlauf von Bild 2, wobei die Verläufe von Sauerstoffgehalt (O_2 -Wert), Abgastemperatur und Leistung des Abgasventilators schematisch dargestellt sind.

Die aufgezeichnete Leistung bzw. Drehzahl des Abgasventilators ist ein Indikator für die Leistungsvorgabe an den Holzkessel. Der O_2 -Wert zeigt an, wann der Verbrennungsvorgang beginnt und endet. Der Verbrennungsvorgang, der für die Emissionen entscheidend ist, setzt mit geringer Verzögerung gegenüber der Leistungsvorgabe ein und endet nach dem Ausbrand des Brennstoffs. Die Abgastemperatur nach dem Wärmeübertrager steigt zeitverzögert an, weil der Kessel zuerst wieder auf Betriebstemperatur gebracht werden muss. Der stationär erreichte Endwert der Abgastemperatur ist abhängig von der Leistung des Kessels.

Die Leistung steigt an und erreicht nach ca. 60 Minuten Volllast. Nach ca. 30 weiteren Minuten erfolgt ein Übergang auf Minimallast, nach weiteren 30 Minuten wird der Verbrennungsvorgang beendet. Der Abgasventilator läuft ca. weitere 30 Minuten nach, dann wird er abgeschaltet. Nach weiteren ca. 30 Minuten beginnt der Zyklus erneut.

Die EIN-Phase dauert in diesem Beispiel ca. 2.5 Stunden, es ist aber bei ungünstig betriebenen Anlagen keine Seltenheit, dass die EIN-Phase oft auch nur ca. 15 bis 30 Minuten dauert.

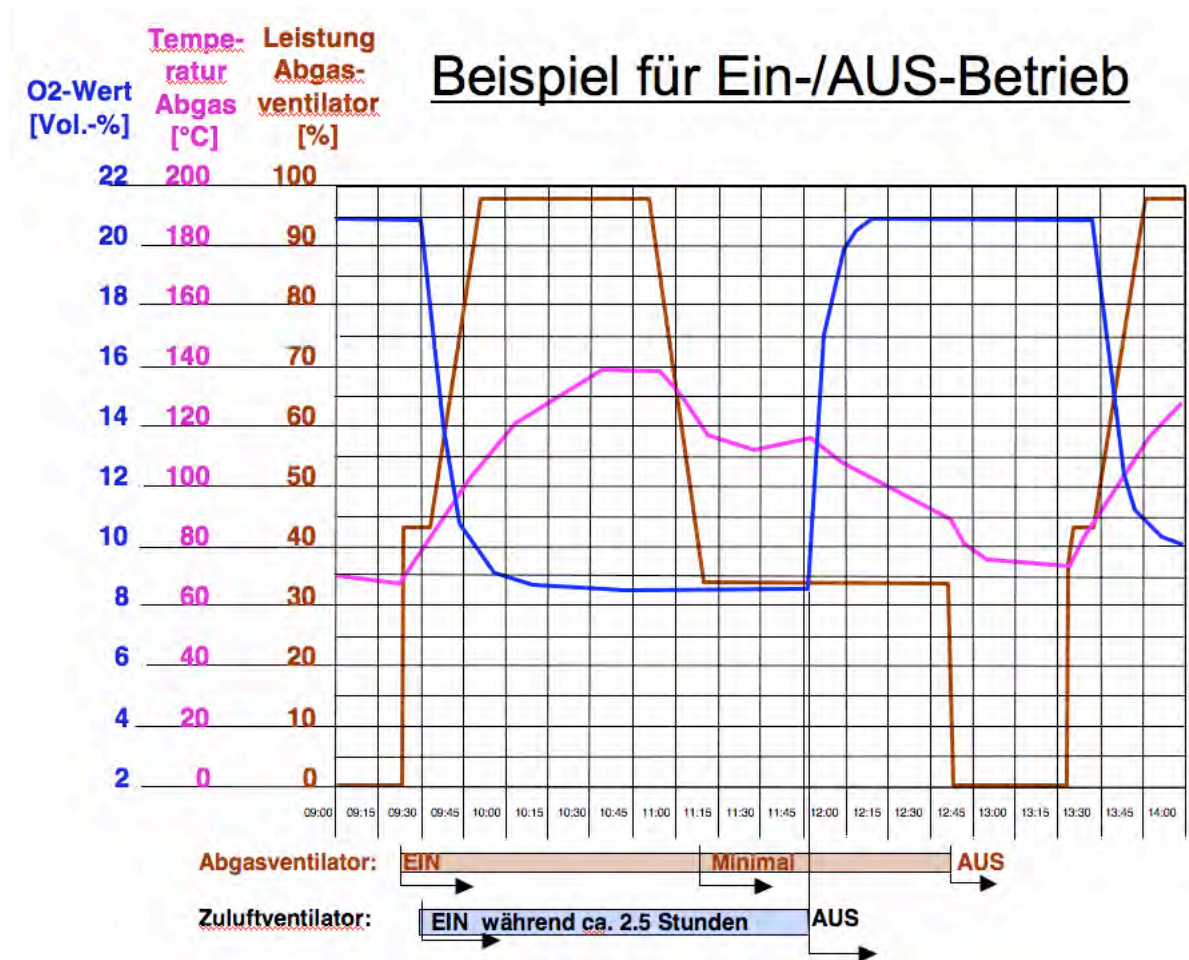


Bild 3 Beispielhafter Verlauf eines einzelnen EIN/AUS-Zyklus einer automatischen Holzfeuerung.

Betriebsverhalten im Saisonverlauf

Im Rahmen von Untersuchungen zum Jahresnutzungsgrad an einer automatischen Holzfeuerung (Unterschubfeuerung, Nennleistung 350 kW, Baujahr 1990, monovalent, Raumwärme und Warmwasser, Betrieb nur während der Heizperiode, Speicher vorhanden, allerdings auf der Sekundärseite) wurden während einer Heizperiode täglich Messwerte protokolliert. Eine Auswahl aus dieser sonst nicht in dieser Form verfügbaren Datenbasis zeigen Bild 4, Bild 5 und Bild 6.

Zu Beginn der Heizperiode treten im Mittel rund 10 Anfahrvorgänge pro Tag auf. Bei kalter Witterung sind es rund 5 Starts pro Tag, bei warmer Witterung bzw. gegen Ende der Heizperiode können über 20 Starts pro Tag auftreten. Der tägliche Anteil an Standby-Betrieb und an den drei verschiedenen Lastbereichen variiert deutlich in Funktion der Aussentemperatur. Zu Beginn und gegen Ende der Heizperiode liegt der tägliche Anteil an Standby bei ca. 40%.

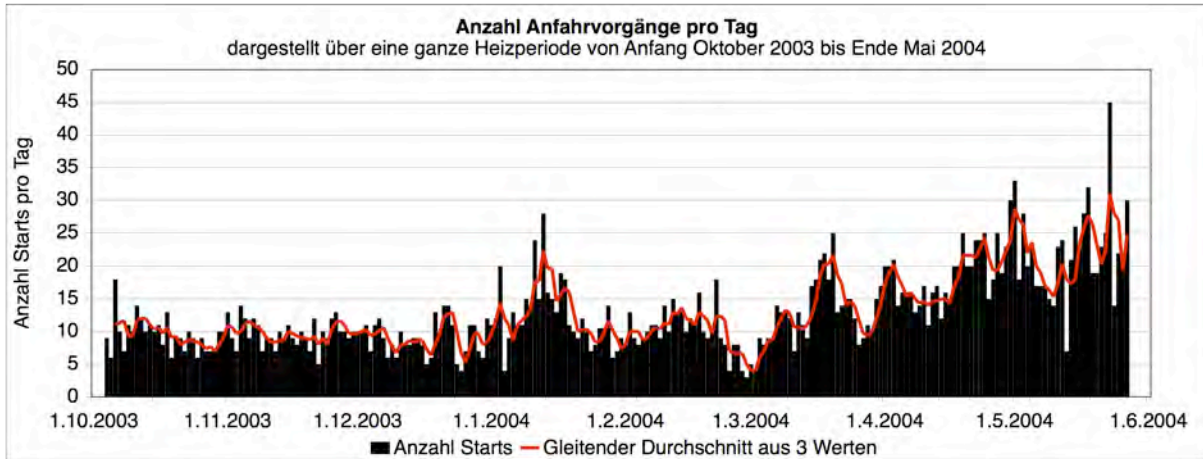


Bild 4 Anzahl der täglichen Starts einer automatischen Holzfeuerung während einer Heizperiode.

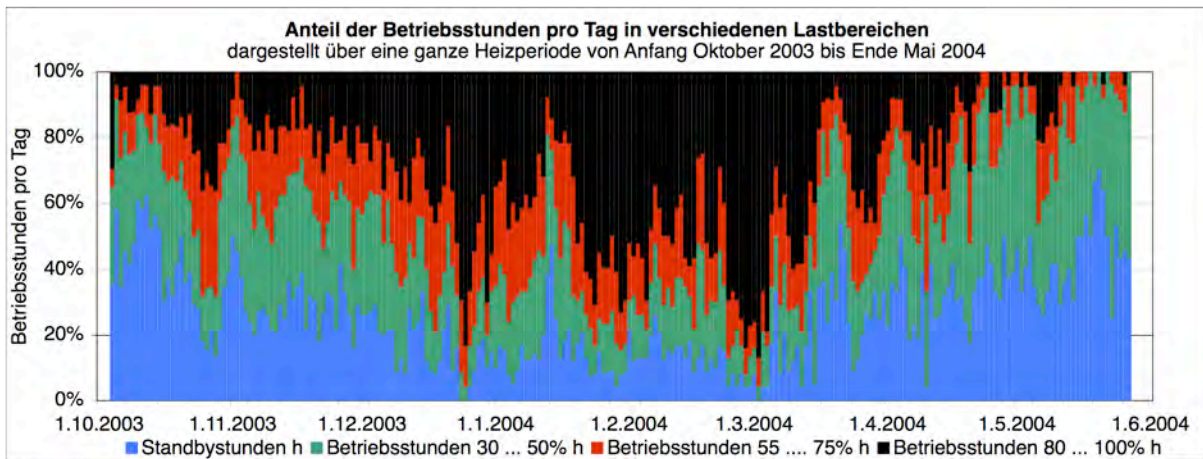


Bild 5 Anteil der täglichen Betriebsstunden in den verschiedenen Lastbereichen einer automatischen Holzfeuerung während einer Heizperiode.

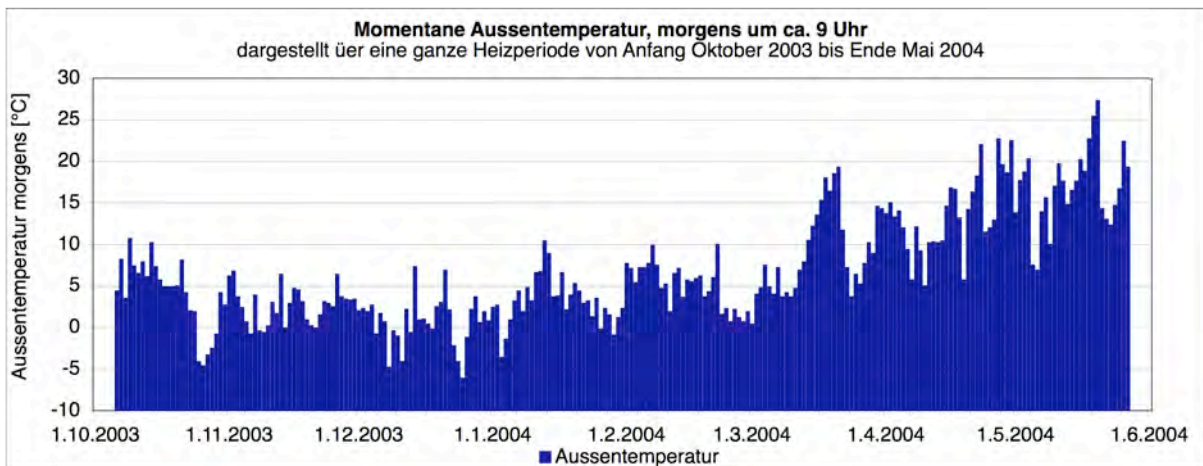


Bild 6 Momentane Aussentemperatur morgens um 9 Uhr während einer Heizperiode.

4 Betriebsverhalten von Staubabscheidern

4.1 Bauformen von Staubabscheidern

Zur Abscheidung grober Partikel mit Korngrößen über 5 bis 10 Mikrometer kommen Fliehkraftabscheider zum Einsatz, die meist als Multizyklone ausgeführt werden. Da im Abgas von automatischen Holzfeuerungen hohe Konzentrationen an Feinstaub kleiner 5 Mikrometer enthalten sind, reichen Multizyklone zur Einhaltung der verschärften Emissionsgrenzwerte nicht aus, werden jedoch teilweise als Vorabscheider eingesetzt. Die häufigsten Verfahren zur Feinstaubabscheidung beruhen auf folgenden Mechanismen:

- Elektrische Feldkräfte (Trocken- und Nass-Elektroabscheider)
- Filtration, Gitterwirkung und Haftkäfte (Gewe-, Metall-, Schüttschicht- und Keramikfilter)
- Nassentstaubung, Nasswäscher (Grenzflächenkräfte).

Im praktischen Einsatz stehen heute in erster Linie Trocken-Elektroabscheider und Gewebefilter. Die weiteren Ausführungen behandeln deshalb die Möglichkeiten zur Kontrolle von Trocken-Elektroabscheidern und Gewebefiltern, wobei zusätzlich die Bauarten nach Tabelle 2 unterschieden werden.

Tabelle 2 Typen von Trocken-Elektroabscheidern und Gewebefiltern und deren Verbreitung.

Typ	Merkmale 1	Merkmale 2	Verbreitung	Beispiele
Platten-Elektroabscheider	Ohne Bypass	Maximale Hochspannung	Oft im Bereich 500 – 1000 kW	Aerob-Beth Scheuch
		Reduzierte Hochspannung		
	Mit Bypass	–		unbekannt
Rohr-Elektroabscheider	Ohne Bypass	Maximale Hochspannung		Aerob-Beth Scheuch
		Reduzierte Hochspannung		
	Mit Bypass	–	In Entwicklung für Bereich 200 – 500 kW	Schmid ¹⁾
Gewebefilter	Mit Bypass	–	Wenig, im Bereich 500 – 1000 kW	Scheuch
	Ohne Bypass dank Metallgewebe	–	Im Probetrieb für Bereich 100 – 540 kW	Köb ²⁾

¹⁾ Schmid, R.: Rohrelektroabscheider für Holzfeuerungen ab 200 kW: Entwicklung und Praxiserfahrung, 9. Holzenergie-Symposium 2006, ETH Zürich

²⁾ Scheibler, M., Oberforcher, P.: Metallgewebefilter für automatische Anlagen von 100 kW bis 540 kW, 10. Holzenergie-Symposium, 2008

4.2 Emissionsrelevante Parameter bei Feinstaubabscheidern

Die Staubkonzentration im Reingas von Elektroabscheidern wird bei ungestörtem Betrieb der Anlage vor allem durch die Auslegung und Dimensionierung des Abscheiders bestimmt und sie hängt in untergeordnetem Mass vom Staubgehalt im Rohgas ab. Bei Gewebefiltern erfolgt im regulären Betrieb eine annähernd vollständige Abscheidung auf der Filterschicht. Die Dimensionierung des Abscheiders beeinflusst dabei den Druckverlust über den Abscheider erheblich, der Reingaswert wird jedoch durch die Filterflächenbelastung innerhalb der zulässigen Betriebsgrenzen nur wenig beeinflusst. Ebenso beeinflusst auch der Rohgasgehalt den Reingasgehalt nach einem Gewebefilter nur in untergeordneter Weise. Bei beiden Abscheidertypen können jedoch während bestimmter Betriebsphasen erhöhte Reingasemissionen auftreten, welche die gesamte Staubfracht und damit die mittleren Staubkonzentrationen deutlich erhöhen können. Die wichtigsten Betriebszustände mit erhöhten Emissionen sind bei einem regulären Betrieb der Anlage insbesondere¹:

- die **Abreinigungsphase**
- ein allfälliger Betrieb einer Umgehungsleitung (**Bypass-Betrieb**)
- bei Elektroabscheidern ein allfälliger Betrieb mit **reduzierter oder ausgeschalteter Spannung**.

Daneben können auch Betriebsphasen mit defekten Abscheidern zu erhöhten Emissionen führen. Entsprechende Betriebszustände sind insbesondere²:

- **Gasleckagen** von der Rohgas- auf die Reingasseite des Abscheiders durch Undichtigkeiten im Abscheider sowie durch Leckage durch allfällige Umgehungsleitungen
- Betrieb von Gewebefiltern mit Haarrissen oder **Leckagen in den Filterschläuchen**.

Folgende Kriterien sind deshalb im Hinblick auf das Betriebsverhalten von Staubabscheidern wichtig:

- Vorhandensein eines Bypass (Anmerkung: Der Messstutzen für die Staubmessung im Reingas muss nach dem Bypass angeordnet sein).
- Dichtheit des Bypass bzw. Schlupf durch den Bypass.
- Bereich der Betriebstemperatur des Abscheiders (abhängig vom Wassergehalt des Brennstoffs bzw. Taupunkt des Abgases): Mindesttemperatur und Maximaltemperatur, für Elektroabscheider zudem Mindesttemperatur für Teilspannung und Mindesttemperatur für Maximalspannung.
- Bei Elektroabscheidern
 - Rohgasgehalt
 - Anzahl der Felder (1-Feld / 2-Feld)
 - Reduktion oder Abschaltung der Hochspannung bei Unterschreitung der Betriebstemperatur oder bei Teillastbetrieb
 - Art und Häufigkeit der Abreinigung.

¹ Es wird davon ausgegangen, dass diese Betriebszustände als nach LRV Art. 14 „für die Beurteilung wichtige Betriebszustände“ zu bewerten und deshalb zu erfassen sind.

² Dito.

- Bei Gewebefiltern
 - Art und Häufigkeit der Abreinigung
 - Detektion allfälliger Risse oder Leckagen in den Filterschläuchen (z.B. durch Druckdifferenzüberwachung)
 - In untergeordnetem Mass: Rohgasgehalt
- Für beide Arten von Abscheidern ist der zeitliche Anteil des Betriebs mit reduzierter Abscheidung oder ohne Abscheidung (Umgehung oder Abschaltung der Hochspannung) entscheidend.

Ein **Betrieb ohne Abscheidung** tritt in der Regel dann auf, wenn eine Störung am Staubabscheider auftritt oder wenn der Betriebsbereich der Abgastemperatur unterschritten oder (seltener) überschritten wird. Der Abscheider geht dabei entweder auf **Bypassbetrieb** oder schaltet die Hochspannung aus. Die Reingaswerte steigen während des Betriebs ohne Abscheidung auf das Niveau der Rohgaswerte an. Die Einhaltung eines Emissionsgrenzwertes (als Mittel über den ganzen Betrieb) ist dann abhängig vom Grenzwert, dem Rohgaswert, dem Reingaswert und dem zeitlichen Anteil an Betrieb ohne Abscheidung. Falls der Reingaswert gerade dem Grenzwert entspricht, muss der Abscheider zu 100% verfügbar sein, wenn der Reingaswert tiefer ist als der Grenzwert, ist dagegen ein zeitweiser Betrieb mit reduzierter Abscheidung zulässig, wobei der Anteil der Betriebszeit mit reduzierter Abscheidung rechnerisch ermittelt werden kann.

Beispiel

Bild 7 und Bild 8 zeigen den rechnerisch ermittelten mittleren Staubgehalt im Reingas in Funktion des zeitlichen Anteils von Betrieb ohne Abscheidung für unterschiedliche Randbedingungen (Grenzwert, Roh- und Reingasgehalt) für ein fiktives Beispiel. Liegt der Reingaswert deutlich unter dem Grenzwert, so darf der zeitliche Anteil an Betrieb ohne Abscheidung bei reinem Volllastbetrieb 10 % (Bild 7) bzw. 17 % (Bild 8) betragen, damit das Tagesmittel des Grenzwerts im Reingas eingehalten bleibt. Sobald auch Teillastbetrieb berücksichtigt wird, steigt der zulässige Anteil an Betrieb ohne Abscheidung, bei dem das Tagesmittel des Grenzwerts noch eingehalten wird. Sind Reingaswert und Grenzwert gleich, so muss die Abscheidung zu 100 % verfügbar sein.

Zusätzlich zum Tagesmittelwert verlangt LRV Art. 15 Absatz 4b und 4c, dass bei kontinuierlicher Messung der Emissionen 97 Prozent aller Stundenmittelwerte innerhalb eines Kalenderjahres das 1,2-fache des Grenzwertes bzw. 100% aller Stundenmittelwerte innerhalb eines Kalenderjahres das 2-fache des Grenzwertes nicht überschreiten dürfen. Die Kontrolle dieser Bedingung setzt voraus, dass die Stunden- und Tagesmittelwerte während eines Jahres erfasst und dokumentiert sowie laufend oder nach Ablauf eines Jahres ausgewertet werden.

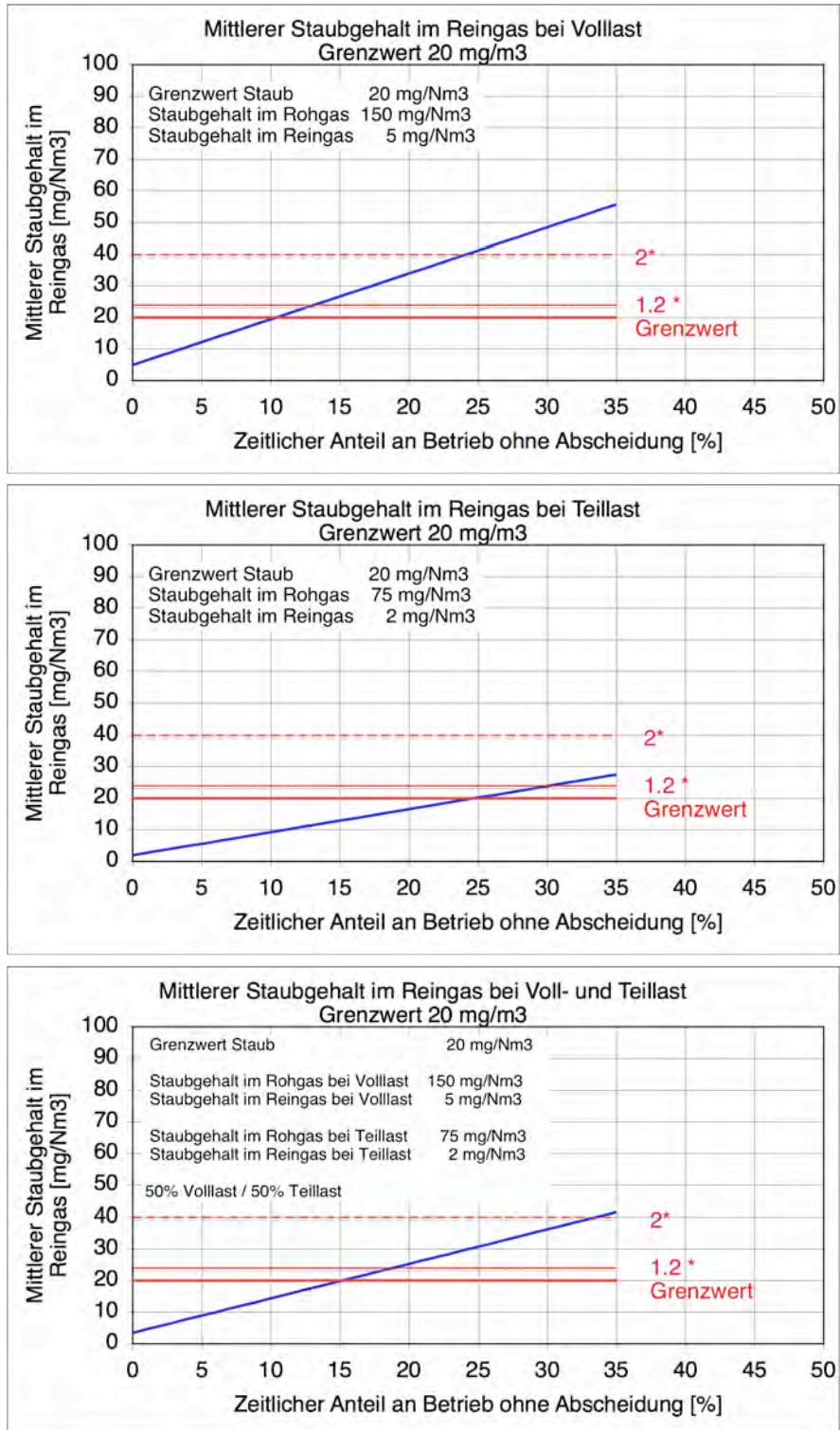


Bild 7 Beeinflussung des mittleren Staubgehalts im Reingas. Betrieb ohne Abscheidung berechnet für reinen Volllastbetrieb, für reinen Teillastbetrieb mit verminderten Emissionen und für 50%Voll- und 50% Teillastbetrieb im Vergleich zum Grenzwert von 20 mg/m_n³.

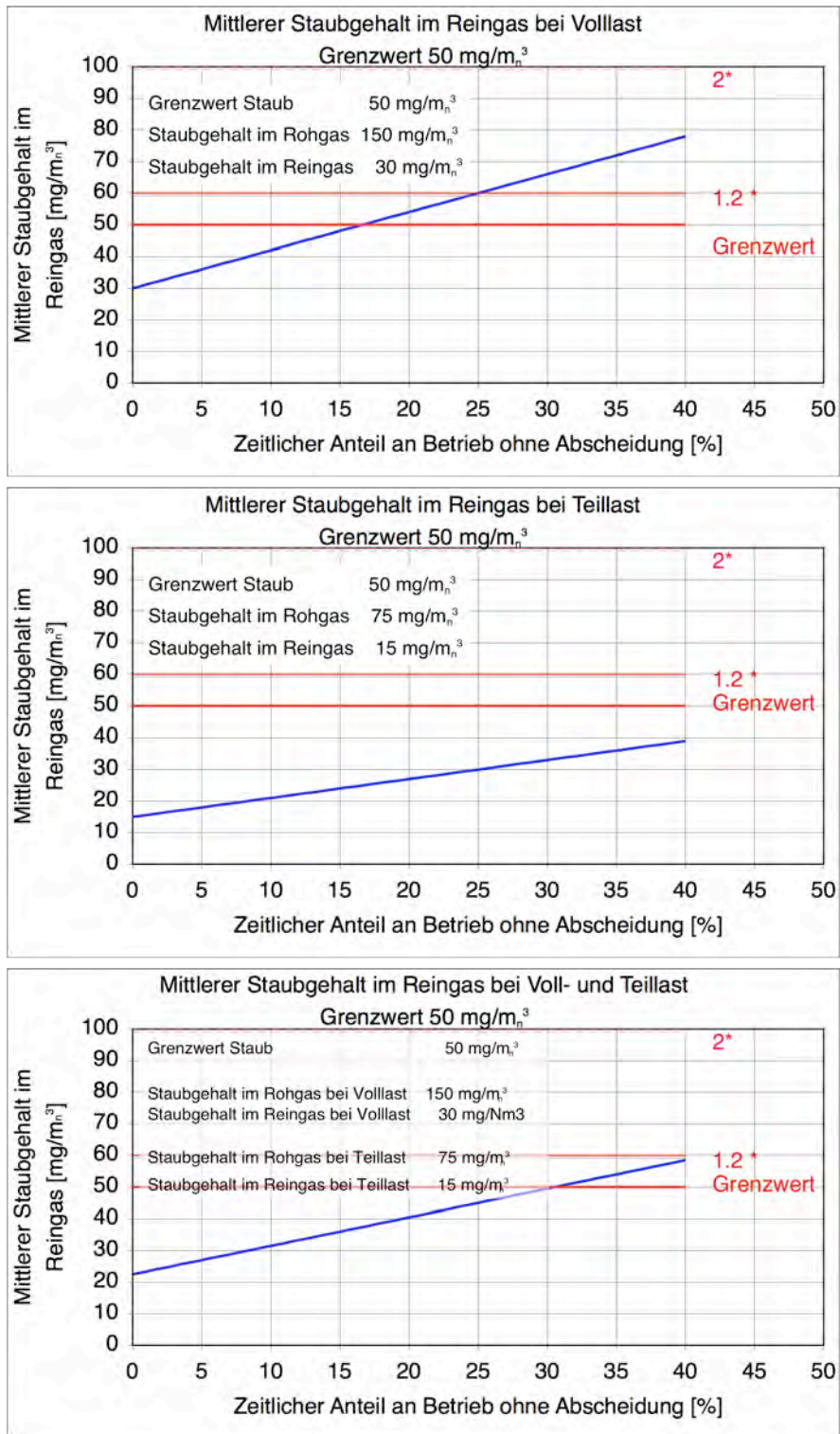


Bild 8 Beeinflussung des mittleren Staubgehalts im Reingas. Betrieb ohne Abscheidung berechnet für reinen Volllastbetrieb, für reinen Teillastbetrieb mit verminderten Emissionen und für 50%Voll- und 50% Teillastbetrieb im Vergleich zum Grenzwert von 50 mg/m_n^3 .

4.3 Betriebsweise von Staubabscheidern

4.3.1 Heute im Einsatz stehende Systeme

Derzeit stehen im betrachteten Leistungsbereich bis 1 MW für Holzfeuerungen vor allem zwei Produkte im Einsatz: Trocken-Elektroabscheider in Plattenbauweise und Gewebefilter. Rohr-Elektroabscheider für den Leistungsbereich 200 – 500 kW sind in Entwicklung, Metallgewebefilter für den Leistungsbereich 200 – 500 kW sind von einem Anbieter im Probetrieb.

4.3.2 Informationsfluss zwischen Feuerung und Staubabscheider

Informationsfluss von Holzfeuerung zu Staubabscheider

Die Feinstaubabscheider erhalten in der Regel von der Steuerung der Holzfeuerung (SPS) ein Freigabesignal, sobald die Zuluftgebläse der Holzfeuerung in Betrieb sind. Die Freigabe wird zurückgenommen, sobald die Zuluftgebläse ausgeschaltet werden. Nach dem Ausschalten der Zuluft läuft das Abgasgebläse in der Regel noch ca. 10 bis 20 Minuten nach. Während dieser Nachlaufzeit ist der Abgasvolumenstrom reduziert und in der Regel gering. Gleichzeitig können die Konzentrationen an Emissionen aus unvollständiger Verbrennung und damit auch die Feinstaubemissionen hoch sein. Da bis anhin kaum Messungen zu diesem Betriebsverhalten vorliegen, ist eine Quantifizierung der Feinstaubemissionen aus diesem Betriebsanteil bis anhin nicht sicher möglich. Zur Klärung dieser Frage besteht deshalb ein Untersuchungsbedarf.

Bei Elektroabscheidern wird zusätzlich zur Freigabe in der Regel auch eine Information über die Leistung der Holzfeuerung übermittelt, also zum Beispiel „Betrieb des Holzkessels über 50% Leistung bzw. unter 50% Leistung“. Bei niedriger Leistung des Holzkessels ist der Abgasvolumenstrom durch den Elektroabscheider reduziert, weshalb das Hochspannungsniveau von z.B. 50 kV – 70 kV bei Volllast auf z.B. 15 kV – 25 kV bei Teillast gesenkt wird. Bei einer Absenkung der Hochspannung wird vorausgesetzt, dass die erforderlichen Reingaswerte bei Teillastbetrieb auch mit der verminderten Hochspannung erreicht werden, da der Rohgasgehalt geringer und die Verweilzeit im Abscheider länger ist. Dies ist im Grundsatz plausibel. Da jedoch keine Messungen von Praxisanlagen dazu vorliegen, besteht auch zu einer Quantifizierung dieses Einflusses noch ein Untersuchungsbedarf. Dabei ist insbesondere zu beachten, dass Heizanlagen im Praxisbetrieb sehr oft bei Teillast betrieben werden, weshalb dieser Betriebszustand relevant ist für die Gesamtemissionen.

Interne Informationsverarbeitung beim Staubabscheider

Um Störungen und Schäden zu vermeiden, müssen Taupunktunterschreitungen in Trocken-Elektroabscheidern und noch verstärkt in Gewebefiltern verhindert werden. Bei Platten-Elektroabscheidern werden dazu die aus dem Gasstrom zurückversetzten Isolatoren und die Bunker-/Staubaustrageflächen mit einer geregelten Begleitheizung beheizt und die Hochspannung bei Unterschreitung einer Minimaltemperatur vermindert oder ausgeschaltet. Bei ausgeschalteter Hochspannung wird der Gasstrom zwar durch den Abscheider geführt, die Feinstaubabscheidung ist jedoch praktisch wirkungslos. Bei Gewebefiltern wird der Gasstrom über eine eigentliche Bypassleitung am Abscheider vorbeigeführt. Rohrelektroabscheider mit und ohne Bypass für den Leistungsbereich 200–500 kW sind in Entwicklung.

1. Beispiel Platten-Elektroabscheider Aerob-Beth: Die interne Steuerung von Hochspannungsniveau, Beheizung von Komponenten des Abscheiders oder Aktivierung der Bypassleitung erfolgt in der Regel über die Messung der Abgastemperatur beim Eintritt in den Abscheider. Bei Platten-Elektroabscheidern werden die zurückversetzten Isolatoren und die Bunker-/Staubaustrageflächen auf mindestens 50°C vorgewärmt. Während des Betriebs regelt die Begleitheizung auf eine Temperatur von 95°C – 110°C, bei Betriebstemperaturen über 110°C wird die Begleitheizung ausgeschaltet. Bei Teillastbetrieb wird die Hochspannung bei Unterschreitung von 125°C auf 15–25kV abgesenkt, unter 110°C wird sie ausgeschaltet. Allerdings können die entsprechenden Sollwerte für Temperatur und Hochspannung je nach Betriebsbedingungen (Brennstoff-Wassergehalt, häufiger Betrieb bei niedriger Abgastemperatur und weitere Faktoren) verändert werden. So kann z.B. die Mindesttemperatur von 110°C auf 130°C angehoben werden, um Taupunktunterschreitungen sicher zu verhindern. Je nach Betriebsweise der Anlage kann dies allerdings bereits zu einem sehr hohen Anteil an Betrieb mit reduzierter oder gar ohne Abscheidung führen. Aus diesem Grund sollten die Sollwerte für die Betriebsweise des Feinstaubabscheiders zumindest protokolliert und zu Händen der Behörde dokumentiert sowie die entsprechenden Kompetenzen geregelt werden müssen.
2. Bei gut wärmegeprägten bzw. beheizten Rohrelektroabscheidern mit Bypass wird der Bypass in der Regel erst bei Unterschreitung einer Mindesttemperatur von 80°C aktiviert, um hohe Betriebszeiten mit Abscheidung zu erzielen.
3. Gewebefilter sind besonders empfindlich auf Taupunktunterschreitungen, die Mindesttemperaturen werden von den Herstellern mit 140°C bis 180°C angegeben. Sicherer Betrieb mit feuchtem Brennstoff ist erst bei Temperaturen von 180°C bis 220°C gegeben, was aber erhebliche Einbussen beim Wirkungsgrad zur Folge hat. Gewebefilter werden deshalb nur bei trockenem Brennstoff und Betrieb mit wenig Anfahrzyklen empfohlen.
4. Beheizbare Metallgewebefilter ohne Bypass können weitgehend unabhängig vom Wassergehalt und der Betriebstemperatur ohne Bypass betrieben werden. Dazu liegen allerdings noch keine belastbaren Praxiserfahrungen vor, da erst ein probeweiser Einsatz eines Produkts erfolgt.

Insgesamt besteht somit bei allen vier aufgeführten Arten von Abscheidern und Betriebsweise ein Untersuchungsbedarf zur bisherigen Betriebsweise und den dabei erwarteten Feinstaubemissionen im Praxisbetrieb.

Informationsfluss von Staubabscheider zur Holzfeuerung

Um einen Betrieb der Feuerungsanlage im Falle von Störungen im Feinstaubabscheider zu verhindern, ist ein Informationsfluss vom Feinstaubabscheider oder einer kontinuierlichen Staubüberwachung zur Holzfeuerung erforderlich. Eine Überwachung des Feinstaubabscheiders kann zum Beispiel bei Gewebefiltern durch eine Druckdifferenzmessung über das Filter erfolgen, welche Risse oder Schäden im Filter erkennen kann. Eine weitere Überwachung erfolgt in der Regel über eine Temperaturüberwachung, welche die Filter vor Übertemperaturen oder einem Brand schützen. Allerdings ist nicht bekannt, ob und in welcher Art eine Überwachung zum Schutz der Feinstaubabscheider bei Anlagen unter 1 MW erfolgt und wie weit ein Informationsfluss vom Feinstaubabscheider zur Holzfeuerung erfolgt und dort regelungstechnisch verwendet wird, weshalb diese Frage noch untersucht werden müsste.

4.3.3 Betriebsverhalten bei kontinuierlichem Voll- und Teillastbetrieb sowie EIN/AUS-Phasen

Bild 9 und Bild 10 zeigen ein fiktives Beispiel zum Betrieb einer Holzfeuerung mit 500 kW Kesselnennleistung und einem einfeldrigen Elektroabscheider. Die Grafiken stellen den zeitlichen Verlauf verschiedener Grössen qualitativ dar, unter anderem der **Staubkonzentration** im Roh- und Reingas sowie der **Staubfracht** im Roh- und Reingas. Bild 9 zeigt kontinuierlichen Betrieb bei Volllast (links) und Teillast (rechts), die Konzentrations- und Fracht-Peaks sind auf das Reinigungsintervall (Klopfen) des Elektroabscheiders zurückzuführen. Beim Reinigungsvorgang eines einfeldrigen Elektroabscheiders steigen die Reingaskonzentration und -fracht an, weil die durch das Abklopfen kurzfristig hohe Staubkonzentration im Abscheider nicht vollständig abgeschieden werden kann. Bei zweifeldrigen Elektroabscheidern scheidet beim Abreinigen des ersten Feldes das zweite Feld den zusätzlichen Staub weitgehend ab. Bei der Reinigung des zweiten Feldes steigen die Reingaskonzentration und -fracht wieder kurzfristig an. Bei kontinuierlichem Betrieb der Holzfeuerung ist der Abscheidegrad bezogen auf Konzentration und Fracht gleich gross, die Verfügbarkeit des Staubabscheiders ist dabei maximal.

Bild 10 zeigt Volllastbetrieb, der durch mehrere EIN/AUS-Phasen unterbrochen wird. Zusätzlich zu den Abreinigungs-Peaks treten bei jedem Ausbrand und Anfahren weitere Konzentrations- und Fracht-Peaks auf, links mit optimiertem Anfahr- und Ausbrandvorgang, rechts ohne entsprechende Optimierung. Die Höhe und Dauer der Emissionspeaks ist nur qualitativ dargestellt, genaue Kenntnisse über Konzentrationsverlauf und Verlauf des Abgasvolumenstroms während dieser bezüglich Schadstoffen bedeutenden Phasen liegen nicht vor. Um eine zuverlässige Entscheidungsbasis zu ermöglichen, wird deshalb empfohlen, entsprechende Daten in einer experimentellen Untersuchung zu erheben.

Sobald EIN/AUS-Phasen auftreten, nehmen zwar die Rohgaswerte im Vergleich zum kontinuierlichen Volllastbetrieb ab, weil aber Phasen mit ungenügender Abscheidung auftreten, nehmen die Reingaskwerte deutlich zu. Während sich im Falle ohne optimiertes Anfahren und Ausbrand (rechts) die Reingaskonzentrationen verdoppeln, vervierfacht sich die Reingasfracht. Der Grenzwert von 20 mg/m_n^3 würde im Tagesmittel somit nicht mehr eingehalten, obwohl der Elektroabscheider während der EIN-Phasen der Holzfeuerung zu 97% verfügbar ist. Dies zeigt, dass die nach LRV Art. 15 Abs. 4 Ziff. b genannte Forderung, dass 97% aller Stundenmittelwerte den 1,2-fachen Grenzwert nicht überschreiten dürfen, nicht allein durch eine Kontrolle der zeitlichen Verfügbarkeit des Abscheiders kontrolliert werden kann. Das Beispiel zeigt zudem, dass der Abscheidegrad bezüglich Konzentration nicht mit dem Abscheidegrad bezüglich Fracht übereinstimmt. Vielmehr liegt der Abscheidegrad bezüglich Fracht im beschriebenen Beispiel deutlich unter demjenigen bezüglich Konzentration. Sofern also auf eine kontinuierliche Staubmessung verzichtet wird, stellt sich die Frage, was als **Basis für eine Ersatz-Beurteilung für Art. 15** dienen soll, da nur bei einer Einschränkung auf eine oder mehrere Ersatzanforderungen auf eine kontinuierliche Staubmessung verzichtet werden kann. Dabei ist in Kauf zu nehmen, dass eine oder mehrere Ersatzanforderungen die Einhaltung sämtlicher Einzelanforderungen von Art. 15 nicht sicherstellen können. Obwohl jede Einzelanforderung isoliert betrachtet sinnvoll ist, wird deshalb im Weiteren vorgeschlagen, dass die Einhaltung der **Emissionsfracht auf Jahresbasis** Priorität hat und

deshalb als Basis dient, wenn Art. 15 wie im Folgenden ausgeführt, durch **eine einzelne Ersatzanforderung** ersetzt werden soll. Die Emissions*fracht* wird als wichtiger als eine Schadstoffkonzentration beurteilt, weil eine geringe Abgasmenge mit einer gewissen Konzentration als weniger schädlich bewertet wird als eine grosse Abgasmenge mit derselben Konzentration. Allein durch die Konzentration wird dies gerade nicht erfasst, weshalb die **Fracht** berücksichtigt werden sollte, die sich als Produkt aus Abgasmenge und -konzentration ergibt. Eine Frachtabschätzung setzt somit voraus, dass die Abgasmenge gemessen oder bestimmt wird. Eine Bestimmung ohne Messung des Abgasvolumenstroms ist zum Beispiel möglich durch eine Bilanzierung der Anlage und eine Kenntnis über die momentane Leistung, welche aus der Anlagensteuerung verfügbar sein kann. Eine Bewertung der Fracht auf **Jahresbasis** wird als wesentlich betrachtet, weil für die resultierende Luftverschmutzung die gesamthaft emittierte Schadstoffmenge insgesamt als prioritär bewertet wird, auch wenn dies die zeitliche Abhängigkeit der Immissionssituation vernachlässigt.

Aus diesen Gründen wird vorgeschlagen, im Falle einer Einschränkung auf eine einzige Beurteilungsgrösse die Emissions*fracht* (oder damit gleichbedeutend die mit der Abgasmenge gewichtete Emission) auf Jahresbasis zu verwenden. Durch Einhaltung dieser Ersatzanforderung können allerdings kurze, besonders emissionsintensive Betriebsphasen nicht ausgeschlossen werden. Sofern solche auftreten, muss somit auf die Einzelanforderungen gemäss Art. 15 zurückgegriffen werden oder es müssen zusätzliche Ersatzanforderungen definiert werden.

Im Falle von EIN/AUS-Phasen ist zu beachten, dass die Bildung von korrekten Tages- und Stundenmittelwerten wesentlich aufwändiger wird, weil während der AUS-Phasen Konzentration und Volumenstrom stark ändern und zeitweise gegen Null gehen. So könnte theoretisch ein hoher Stundenmittelwert der Konzentration auftreten, obwohl der Abgasvolumenstrom und somit die Fracht annähernd Null wären. Es besteht somit ein Interpretationsbedarf, wie die EIN/AUS-Phasen nach LRV Art. 15 Abs. 5 zu bewerten sind.

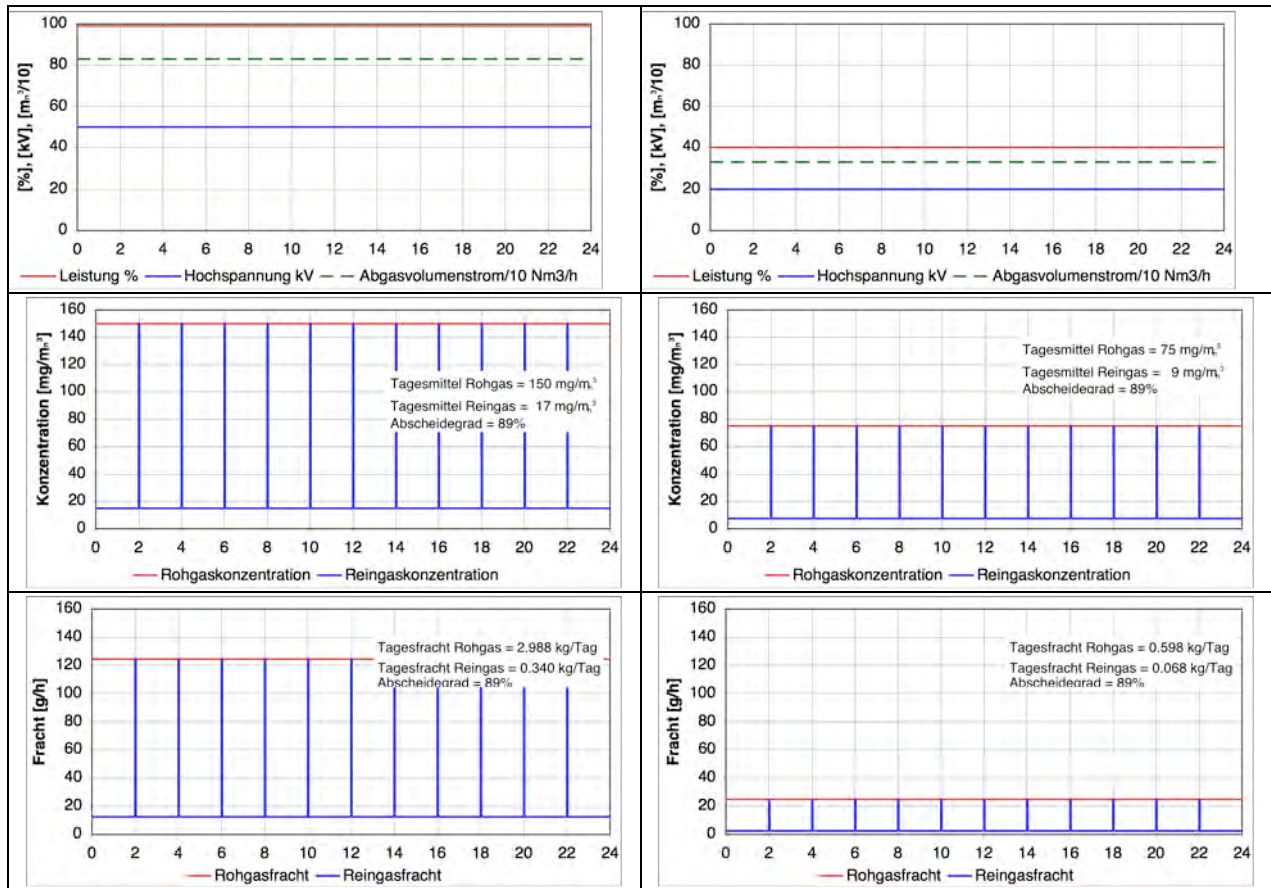


Bild 9 Qualitativer zeitlicher Tagesverlauf der Leistung, der Hochspannung des Elektroabscheiders, des Abgasvolumenstrom, der Staubkonzentration im Roh- und Reingas sowie der Staubfracht einer Holzfeuerung mit folgenden Randbedingungen: Feuerungswärmeleistung 580 kW, Kesselnennleistung 500 kW, Abgasvolumenstrom 830 m³/h. Links: Volllast, rechts: Teillast.

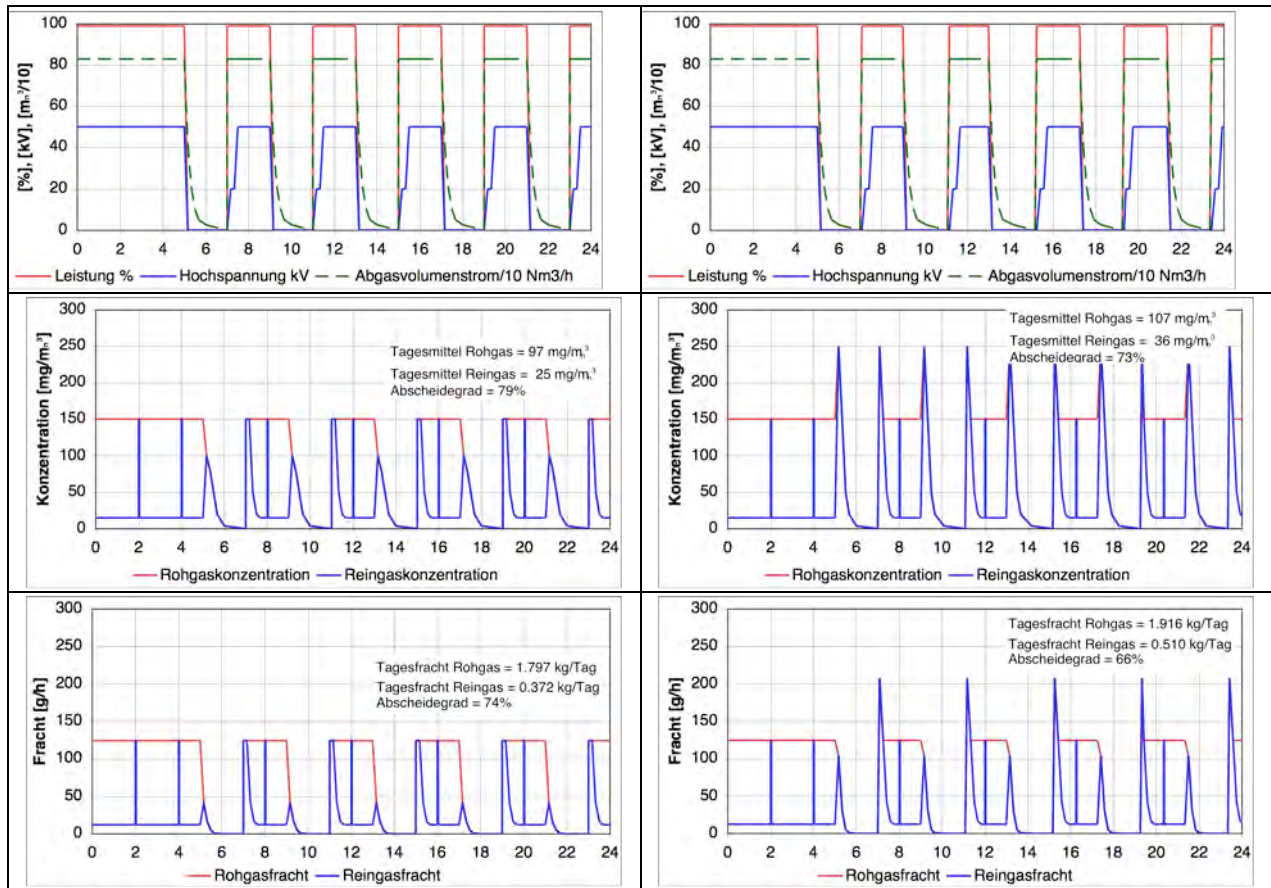


Bild 10 Qualitativer zeitlicher Tagesverlauf der Leistung, der Hochspannung des Elektroabscheiders, des Abgasvolumenstrom, der Staubkonzentration im Roh- und Reingas sowie der Staubfracht einer Holzfeuerung mit folgenden Randbedingungen: Feuerungswärmeleistung 580 kW, Kesselnennleistung 500 kW, Abgasvolumenstrom 830 m_n³/h. Volllast mit EIN/AUS-Zyklen. Links: Mit optimiertem Anfahr und Ausbrandvorgang; ohne Konzentrationspeaks beim Anfahren und Ausbrennen, Rechts: Mit Konzentrationspeaks beim Anfahren und Ausbrennen.

5 Modell zur Abschätzung der Staubemissionen

5.1 Annahmen

Um den Einfluss der Betriebsart auf die Gesamtemissionen einer Holzfeuerung mit Feinstaubabscheider zu illustrieren, wird nachfolgend ein generisches Berechnungsmodell beschrieben, mit dem anhand eines fiktiven Beispiels die Einflüsse unterschiedlicher Betriebsarten aufgezeigt werden.

Für die Holzfeuerung werden folgende Betriebszustände unterschieden:

- Zuluftgebläse EIN/AUS
- Abgasventilator EIN/AUS
- Betriebsart Volllast/Teillast/Anfahren/Abfahren/Standby/AUS.

Für die Feinstaubabscheider werden folgende Betriebszustände unterschieden:

- Abscheider EIN/AUS.

Für den Staubgehalt wird folgendes Beispiel verwendet:

- Der Staubgehalt im Rohgas betrage 150 mg/m_n^3 bei Volllast und 75 mg/m_n^3 bei Teillast.
- Der Staubgehalt im Reingas betrage bei aktiver Abscheidung 10 mg/m_n^3 bei Volllast und 5 mg/m_n^3 bei Teillast, was in beiden Fällen einem Abscheidegrad von rund 93% entspricht.

Der Abgasvolumenstrom der Holzfeuerung wird in Funktion der Feuerungswärmeleistung für Volllast berechnet. Für die anderen Betriebsarten wird er als Schätzwert wie folgt angenommen:

- Bei Teillast betrage der Abgasvolumenstrom 50% des Wertes bei Volllast
- beim An- oder Abfahren mit eingeschaltetem Zuluftgebläse 30%
- beim Abfahren mit ausgeschaltetem Zuluftgebläse bei noch eingeschaltetem Abgasventilator 10%
- im Standby 2%.

Den einzelnen Betriebszuständen der Holzfeuerung sind weiters jährliche Betriebsstunden zugeordnet um Jahres-Staubmittelwerte oder Jahres-Frachten zu berechnen. Dabei werden folgende Betriebsarten der Holzfeuerung unterschieden:

- Bandlastbetrieb
- Betrieb gut
- Betrieb schlecht
- Betrieb schlecht mit Standby.

Ausser bei Bandlastbetrieb entsprechen die jährlichen Betriebsstunden der Holzfeuerung einer jährlichen Vollbetriebsstundenzahl bei Nennleistung von ca. 2'500 h/a. Weiters wird bei Bandlastbetrieb angenommen, dass der Feinstaubabscheider immer EIN sei. Bei den anderen Betriebszuständen der Holzfeuerung wird unterschieden zwischen:

- Feinstaubabscheider immer EIN
- Feinstaubabscheider mit EIN/AUS.

Das Berechnungsmodell ist in Excel programmiert. Eingabegrößen sind rot, berechnete Größen blau markiert. Tabelle 3 zeigt eine Zusammenstellung der Daten zum oben beschriebenen fiktiven Beispiel. Tabelle 4 fasst die Resultate des Beispiels gemäss der in Kapitel 5.2 ausgeführten Berechnungen zusammen. Tabelle 5 zeigt die Ersatz-Berechnung zur Bewertung der Verfügbarkeit nach dem in Kapitel 6 beschriebenen Vorgehen für das Beispiel.

Tabelle 3 Annahmen zu den Betriebszuständen von automatischen Holzfeuerungen und von nachgeschalteten Feinstaubabscheidern mit Eingabegrößen (rot) und berechneten Größen (blau) zur Abschätzung der Staubemissionen.

Bezugs-Sauerstoffgehalt	11	Vol.-%
Lambda norm	2.1	Vol.-%
Feuerungswärmeleistung	1'000	kW
Wassergehalt	30.0	%
Holzfeuchtigkeit	42.9	%

mg/MJ = 0.557 mg/m³ bei O₂ norm für Holz mit u

Betrieb Holzfeuerung		Zuluftgebläse						Abgasventilator						AUS	
		EIN						EIN						AUS	
Betriebsart		Vollast		Teillast		An- oder abfahren		Abfahren		Standby		AUS			
Betrieb Feinstaubabscheider		EIN	AUS	EIN	AUS	EIN	AUS	EIN	AUS	EIN	AUS	EIN	AUS		
	Volumenstrom	m ³ /h	2'007	2'007	1'003	1'003	1'003	1'003	201	201	40	40	0		
	FWL eff	kW	1'000	1'000	500	500	300	300	10	10	2	2	0		
	O ₂	Vol.-%	11	11	11	11	15	15	20	20	20	20	21		
Rohgas	Staubgehalt	mg/m ³	150	150	75	75	150	150	150	150	150	150	0		
Reingas	Staubgehalt	mg/m ³	10	150	5	75	10	150	10	150	10	150	0		
	Lambda	-	2.1	2.1	2.1	2.1	3.5	3.5	21.0	21.0	21.0	21.0			
	Lambda norm	-	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1			
Rohgas	Staubgehalt norm	mg/m ³ _{norm}	150	150	75	75	250	250	1'500	1'500	1'500	1'500	0		
Reingas	Staubgehalt norm	mg/m ³ _{norm}	10	150	5	75	17	250	100	1'500	100	1'500	0		
Reingas	Staubfracht	g/h	20	301	5	75	10	151	2	30	0	6	0		

TOT

Bandlastbetrieb		Vollast	h/a	8'760	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8'760
		Teillast	h/a	0	0	8'760	0	0	0	0	0	0	0	0	8'760
Betrieb gut	Abscheidung immer	h/a	1'000	0	3'000	0	100	0	0	0	0	0	0	4'660	8'760
	Abscheidung mit Ein/Aus	h/a	900	100	2'700	300	0	100	0	0	0	0	0	4'660	8'760
Betrieb schlecht	Abscheidung immer	h/a	1'000	0	3'000	0	200	0	200	0	0	0	0	4'360	8'760
	Abscheidung mit Ein/Aus	h/a	900	100	2'700	300	0	200	0	200	0	0	0	4'360	8'760
Betrieb schlecht mit Standby	Abscheidung immer	h/a	1'000	0	3'000	0	200	0	200	0	4'000	0	360	8'760	
	Abscheidung mit Ein/Aus	h/a	900	100	2'700	300	0	200	0	200	0	4'000	360	8'760	

Tabelle 4 Jahres-Staubfracht, zugeführte Energie, zeitliche Verfügbarkeit des Feinstaubabscheiders sowie Jahresmittel des Staub-Emissionsfaktors und der gewichteten, normierten Staubkonzentration basierend auf den in Tabelle 3 getroffenen Annahmen.

		Staub Jahresfracht	Zugeführte Energie	Jahresmittel			Verfügbarkeit Abscheider
				kg/a	MWhzu/a	Staub Emissionsfaktor	
				g/MWhzu	mg/MJ	mg/m ³ _{norm}	%
Bandlastbetrieb	Vollast	176	8'760	20.1	5.6	10.0	100.0
	Teillast	44	4'380	10.0	2.8	5.0	100.0
Betrieb gut	Abscheidung immer	36	2'530	14.3	4.0	7.1	100.0
	Abscheidung mit Ein/Aus	99	2'530	39.3	10.9	19.6	87.8
Betrieb schlecht	Abscheidung immer	38	2'562	14.6	4.1	7.3	100.0
	Abscheidung mit Ein/Aus	120	2'562	47.0	13.1	23.4	81.8
Betrieb schlecht mit Standby	Abscheidung immer	39	2'570	15.2	4.2	7.6	100.0
	Abscheidung mit Ein/Aus	144	2'570	56.2	15.6	28.0	42.9

Tabelle 5 Beispiel für Verfügbarkeit des Feinstaubabscheiders, minimal notwendige Verfügbarkeit des Feinstaubabscheiders bezogen auf LRV Art. 15. und mittleren Staubgehalt bei Holzfeuerungsbetrieb ohne Teillast. t_F = Betriebsstunden Feuerung, t_A = Betriebsstunden Abscheider.

Staubgehalt	
Grenzwert	20 mg/m ³
Rohgas	150 mg/m ³
Reingas	10 mg/m ³
	Messungen einmal, Volllast
	Messungen einmal, Volllast

LRV	Grenzwert	Bedingung	min. Verf.	Messungen kontinuierlich	eff. Verf.	Emission Staub	f	Bed. F			
Art. 15	mg/m ³	%	t _A /t _F	t _F	t _A /t _F	mg/m ³	c eff / GW	≤			
Abs. 4a	24	1	20	100	92.86	10.00	9.50	17	0.85	1.00	365 Tage/a
Abs. 4b	1	1.2	24	97	90.00	0.80	0.80	10	0.42	1.00	97% von t _F
Abs. 4c	1	2	40	100	78.57			10	0.25	1.00	100% von t

5.2 Berechnungen

Folgende Berechnungen liegen dem Modell zu Grunde:

Luftüberschusszahl λ

$$\lambda = \frac{21}{21 - O_2} \quad [-] \quad (A 1)$$

mit: O_2 = Sauerstoffgehalt im trockenen Abgas [Vol.-%]

Holzfeuchtigkeit u

$$u [\%] = 100 \cdot \frac{W [\%]}{100 - W [\%]} \quad [-] \quad (A 2)$$

mit: W = Wassergehalt [Gew.-%]

Abgasvolumenstrom, trocken, bei Normbedingungen

$$\dot{V}_{AG_{tr}} = \dot{Q}_F \frac{\lambda V_{L_{min}}}{(18,3 - 2,442 \frac{u}{100})} \frac{3'600}{1'000} \quad [m_n^3/h] \quad (A 3)$$

mit: $\dot{V}_{AG_{tr}}$ = Abgasvolumenstrom, trocken, bei 25°C und 1'013 mbar [m_n³/h]
 \dot{Q}_F = Feuerungswärmeleistung (zugeführt) [kW]
 λ = Luftüberschusszahl [-]
 $V_{L_{min}}$ = Stöchiometrisches Verbrennungsluftvolumen = 4,58 [m_n³/kg_{atro}]
 u = Holzfeuchtigkeit [Gew.-%]

Staubgehalt normiert (für Roh- und Reingas)

$$\text{Staubgehalt}_{\text{normiert}} = \text{Staubgehalt} \frac{21 - O_{2\text{Bezug}}}{21 - O_2} \quad [mg/m_n^3] \text{ bei } O_2 \text{ Bezugsgrösse} \quad (A 4)$$

mit: $\text{Staubgehalt}_{\text{normiert}}$ = Emissionswert normiert [mg/m_n³] bei O₂ Bezug
 Staubgehalt = Emissionswert gemessen [mg/m_n³]
 $O_{2\text{Bezug}}$ = Sauerstoffkonzentration der Bezugsgrösse [Vol.-%]

Staubfracht

$$\text{Staubfracht} = \text{Staubgehalt} \cdot \dot{V}_{AG_{tr}} / 1'000 \quad [g/h] \quad (A 5)$$

mit: Staubgehalt = Emissionswert gemessen [mg/m_n³]
 $\dot{V}_{AG_{tr}}$ = Abgasvolumenstrom, trocken, bei = °C, 1'013 mbar [m_n³/h]

Emissionsfaktor (Emission bezogen auf zugeführte Energiemenge)

$$\text{Emissionswert in } mg/MJ_{\text{End}} = \text{Emissionswert in } mg/m_n^3 \frac{\lambda_{\text{Bezug}} V_{L_{min}}}{18,3 - 2,442 \frac{u}{100}} \quad [mg/MJ_{\text{End}}] \quad (A 6)$$

$$\text{Emissionswert in } mg/m_n^3 = \text{Emissionswert in } mg/MJ_{\text{End}} \frac{18,3 - 2,442 \frac{u}{100}}{\lambda_{\text{Bezug}} V_{L_{min}}} \quad [mg/m_n^3] \text{ bei } O_2 \text{ Bezug} \quad (A 7)$$

mit: λ_{Bezug} = Luftüberschusszahl bei O₂ Bezug [-]
 $V_{L_{min}}$ = Stöchiometrisches Verbrennungsluftvolumen = 4,58 [m_n³/kg_{atro}]
 u = Holzfeuchtigkeit [Gew.-%]

Jahres-Staubfracht in kg/a

Die Jahres-Staubfracht wird berechnet durch:

- Multiplizieren der Staubfracht [g/h] im Reingas in einem Betriebszustand mit den entsprechenden Betriebsstunden [h/a] dieses Betriebszustands ergibt die Jahres-Staubfracht in diesem Betriebszustand.
- Summieren der Jahres-Staubfrachten aller Betriebszustände.

Staub-Emissionsfaktor in [g/MWh_{zu}] bzw. [mg/MJ_{zu}]

Der Staub-Emissionsfaktor wird berechnet durch Division der Jahres-Staubfracht [kg/a] durch die zugeführte Jahres-Energiemenge [g/MWh_{zu}] bzw. [mg/MJ_{zu}]. Die zugeführte Jahres-Energiemenge wird berechnet durch:

- Multiplizieren der Feuerungswärmeleistung [kW] in einem Betriebszustand mit den entsprechenden Betriebsstunden [h/a] dieses Betriebszustands
- Summieren der zugeführten Energiemengen aller Betriebszustände.

Gewichtetes Jahresmittel der normierten Staub-Konzentration in [mg/m³] bei O₂ Bezug

Eine rein zeitliche Mittelung der Staubkonzentration ohne Berücksichtigung des Abgasvolumenstroms führt nur bei kontinuierlichem Bandlastbetrieb zu einem korrekten Ergebnis. Sobald Stillstandsphasen sowie An- und Abfahrphasen dazu kommen, müssen die Konzentrationen mit dem Abgasvolumenstrom der jeweiligen Phase gewichtet werden. Das gewichtete Jahresmittel der normierten Staub-Konzentration wird deshalb gemäss Gleichung (A 7) aus den Jahresfrachten berechnet.

5.3 Resultate

Tabelle 4 zeigt die Resultate des Modells auf Basis der in Tabelle 3 getroffenen Annahmen:

- Reiner Teillastbetrieb senkt das Jahresmittel der gewichteten, normierten Staubkonzentration im Vergleich zu reinem Volllastbetrieb von 10 auf 5 mg/m³_{normiert}. Die Jahres-Staubfracht sinkt dabei um einen Faktor 4 (halber Volumenstrom bei halber Konzentration) von 176 kg/a auf 44 kg/a.
- Solange der Abscheider bei Betrieb der Holzfeuerung IMMER eingeschaltet bzw. aktiv ist, liegt das Jahresmittel der gewichteten, normierten Staubkonzentration im Bereich von 7.1 bis 7.6 mg/m³_{normiert}.
- Sobald der Abscheider bei Betrieb der Holzfeuerung NICHT IMMER eingeschaltet bzw. aktiv ist, steigt das Jahresmittel der gewichteten, normierten Staubkonzentration bei gutem Betrieb der Holzfeuerung um ca. einen Faktor 3 von 7.1 auf 19.6 mg/m³_{normiert}, bei schlechtem Betrieb der Holzfeuerung mit Standby um beinahe einen Faktor 4 von 7.6 auf 28 mg/m³_{normiert}. In gleicher Weise verhalten sich auch die Jahres-Staubfrachten.
- Bei gutem Betrieb der Holzfeuerung trägt die fehlende Abscheidung bei Volllast 44%, bei Teillast 34% und beim An- und Abfahren 22% der Erhöhung von 7.1 auf 19.6 mg/m³_{normiert} bei.

Bei schlechtem Betrieb der Holzfeuerung trägt die fehlende Abscheidung bei Volllast 34%, bei Teillast 25%, beim An- und Abfahren 34% und beim Abfahren mit ausgeschaltetem Zuluftgebläse 7% der Erhöhung von 7.3 auf 23.4 mg/m³_{normiert} bei.

Bei schlechtem Betrieb der Holzfeuerung mit Standby trägt die fehlende Abscheidung bei Volllast 27%, bei Teillast 20% und beim An- und Abfahren 27%, beim Abfahren mit ausgeschaltetem Zuluftgebläse 5% und im Standby 21% der Erhöhung von 7.6 auf 28.0 mg/m³_{normiert} bei.

5.4 Folgerungen

Die Folgerungen basieren auf den beschriebenen Annahmen und zeigen deshalb nur die möglichen Einflüsse anhand des fiktiven Beispiels. Andere Annahmen können zu anderen Folgerungen führen.

- Das Modell basiert auf einem Staub-Grenzwert sowie einem Staubwert im **Reingas** und **Rohgas** jeweils bei **Volllast** und **Teillast** der Holzfeuerung. Zur Anwendung auf Basis von validierten Messwerten wären somit vier Emissionsmessungen notwendig.
- Eine korrekte Mittelung der Staubkonzentrationen benötigt die **Gewichtung mit dem Abgasvolumenstrom oder der zugeführten Energie**. Die zeitliche Mittelung der Staubkonzentrationen ohne Gewichtung mit dem Abgasvolumenstrom oder mit der zugeführten Wärme führt zu falschen Mittelwerten.
- **Wenn der Abscheider bei Betrieb der Holzfeuerung IMMER aktiv ist, hat die Betriebsweise der Holzfeuerung nur eine untergeordnete Rolle auf das Jahresmittel von Staubfracht und gewichteter, normierter Staubkonzentration.** Geruchsbelästigungen durch zeitweise hohe Konzentration an Kohlenwasserstoffen beim An- und Abfahren oder im Standby können dadurch allerdings nicht ausgeschlossen werden.
- Wenn der Abscheider bei Betrieb der Holzfeuerung nicht sofort oder nicht immer verfügbar ist, steigt das Jahresmittel von Staubfracht und gewichteter, normierter Staubkonzentration deutlich an und kann auch den Grenzwert übersteigen. Unter den getroffenen Annahmen trägt fehlende Abscheidung bei Volllast rund 30%, bei Teillast rund 20%, beim An- und Abfahren rund 30%, beim Abfahren mit ausgeschaltetem Zuluftgebläse 5% und im Standby 15% der zusätzlichen Erhöhung bei.
- Feinstaubabscheider sollten deshalb möglichst rasch betriebsbereit sein, sobald die Holzfeuerung in Betrieb ist. Die Verfügbarkeit des Feinstaubabscheiders bei eingeschalteter Feuerung muss möglichst gross sein.
- Mit dem Berechnungsmodell können kritische Betriebsweisen und ihr Einfluss auf die Jahres-Mittelwerte untersucht werden.
- Auf Basis des vorgestellten Modells können keine direkten Aussagen zur Einhaltung von Stunden- und Tagesmittelwerten zur Überprüfung von LRV Art. 15 gemacht werden. Dies würde eine effektive Messung voraussetzen. Obwohl mit der Modellauswertung keine sichere Aussage zur Einhaltung aller Einzelforderungen nach LRV Art. 15 möglich ist, kann im Beispiel nachgewiesen werden, dass der Grenzwert bei einer Bewertung der *Jahresfracht* bei einer zeitlichen Verfügbarkeit von 87,8% gerade noch eingehalten und bei geringerer Verfügbarkeit somit überschritten wäre.

Um die Bedeutung der einzelnen Betriebszustände zu überprüfen, wird empfohlen, die für das fiktive Beispiel getroffenen Annahmen an mehreren realen Anlagen zu erheben.

6 Modell zur Ersatz-Beurteilung der Anforderungen nach LRV Art. 15

6.1 Vorgehen

Eine Bewertung der Anforderungen von LRV Art. 15 Abs. 4a, 4b und 4c setzt eine kontinuierliche Messung und Erfassung des Staubgehalts und weiterer Betriebsgrößen und eine darauf basierende Auswertung aller Stunden- und Tagesmittelwerte eines Jahres voraus. Da der Aufwand für dieses Vorgehen mit heutiger Messtechnik für kleine und mittlere Anlagen unverhältnismässig gross ist, wird nachfolgend eine Methode für eine Ersatz-Bewertung von LRV Art. 15 vorgeschlagen. Als Basis zur Bewertung dient dabei der mittlere und gewichtete Staubgehalt, was einer Frachtbetrachtung entspricht. Die Einhaltung der Ersatzbedingung garantiert nur die Einhaltung einer mittleren Anforderung, nicht jedoch die Einhaltung aller Einzelanforderungen nach Art. 15. So können eine oder mehrere der Einzelanforderungen nach Abs. 4a, 4b und 4c nicht erfüllt sein. Es können also namentlich

- ein oder mehrere Tagesmittelwerte überschritten sein,
- mehr als 3% aller Stundenmittelwerte das 1,2-fache des Grenzwerts überschreiten oder
- einer oder mehrere Stundenmittelwerte den Grenzwert um mehr als das Zweifache überschreiten.

Das Modell setzt somit voraus, dass die Einhaltung des **Jahresmittelwerts** höchste Priorität hat und es deshalb für kleine und mittlere Anlagen zu Gunsten der Verhältnismässigkeit des Kontrollaufwands im Regelfall lediglich diese Einzelanforderung kontrolliert wird. Diese Ersatzanforderung kann allerdings nicht garantieren, dass zum Beispiel temporär erhöhte Emissionen lokale Immissionsprobleme verursachen. Aus diesem Grund wird vorgeschlagen, dass die Einhaltung der Einzelanforderungen im Grundsatz nachzuweisen ist und dass dies lediglich im Sinne einer Vereinfachung als in der Regel gegeben angenommen wird, wenn die Ersatzanforderung erfüllt ist.

Das Berechnungsmodell basiert auf der Erhebung folgender Messgrößen:

- Periodische Messung der Staubkonzentration im Roh- und Reingas
- Optional: je bei Voll- und Teillast, sofern diese Zustände unterschieden werden sollen.

Für den Fall eines reinen Volllastbetriebs können damit folgende Berechnungen eingeführt werden.

Mittlerer Staubgehalt C_{Mittel}

$$C_{\text{Mittel}} = \frac{t_A \cdot C_{\text{Rein}} + (t_F - t_A) \cdot C_{\text{Roh}}}{t_F} \quad [\text{mg}/\text{m}_n^3] \quad (\text{A } 8)$$

Zeitliche Verfügbarkeit des Feinstaubabscheiders VF_A

$$VF_A = 100 \cdot \frac{t_A}{t_F} \quad [\%] \quad (\text{A } 9)$$

Minimale zeitliche Verfügbarkeit des Feinstaubabscheiders VF_{A_Min}

$$VF_{A_Min} = 100 \cdot \frac{C_{Roh} - C_{Grenz}}{C_{Roh} - C_{Rein}} \quad [\%] \quad (A 10)$$

mit:	C_{Grenz}	=	Grenzwert für Staubgehalt, normiert	$[\text{mg}/\text{m}_n^3]$
	C_{Mittel}	=	Grenzwert für Staubgehalt, normiert	$[\text{mg}/\text{m}_n^3]$
	C_{Roh}	=	Staubgehalt im Rohgas, normiert (z.B. alle 2 Jahre gemessen)	$[\text{mg}/\text{m}_n^3]$
	C_{Rein}	=	Staubgehalt im Reingas, normiert (z.B. alle 2 Jahre gemessen)	$[\text{mg}/\text{m}_n^3]$
	t_F	=	Zeit während Holzfeuerung EIN	$[\text{h}/\text{d}], [\text{min}/\text{h}], [\text{h}/\text{a}]$
	t_A	=	Zeit während Abscheider EIN	$[\text{h}/\text{d}], [\text{min}/\text{h}], [\text{h}/\text{a}]$

Für das weiter oben beschriebene fiktive Beispiel ergeben sich Resultate nach Tabelle 5 mit folgenden Folgerungen für das Beispiel:

- Mit den getroffenen Annahmen ist die effektive Verfügbarkeit des Feinstaubabscheiders in diesem Tagesmittel höher als die zur Einhaltung von LRV Art. 15 Abs. 4a minimal notwendige Verfügbarkeit von rund 93%.
- Mit den getroffenen Annahmen ist die effektive Verfügbarkeit des Feinstaubabscheiders in diesem Stundenmittel höher als die zur Einhaltung von LRV Art. 15 Abs. 4b und 4c minimal notwendige Verfügbarkeit von 90% bzw. 78.6%.

6.2 Beurteilung

Die Folgerungen basieren auf den beschriebenen Annahmen und zeigen deshalb nur die möglichen Einflüsse anhand des fiktiven Beispiels. Andere Annahmen können zu anderen Folgerungen führen.

- Das Modell basiert auf einem Staub-Grenzwert sowie einem Staubwert im Reingas und Rohgas.
- Um die Anforderungen gemäss LRV Art. 15 Abs. 4a bis 4c zu prüfen, müssen die Betriebszeiten der Holzfeuerung und die Betriebszeiten des Feinstaubabscheiders stündlich und täglich aufgezeichnet werden. Es dürfen nur diejenigen Betriebsstunden des Feinstaubabscheiders berücksichtigt werden, bei denen die Holzfeuerung (bzw. ihr Zuluftgebläse) in Betrieb ist.
- Wenn die Betriebszeiten der Holzfeuerung und des Feinstaubabscheiders nur als jährliche Betriebsstunden vorliegen, können keine direkten Aussagen zu den Anforderungen gemäss LRV Art. 15 gemacht werden. Die jährliche Betrachtungsweise liefert allerdings Hinweise auf die Verfügbarkeit des Feinstaubabscheiders im Jahresmittel und füllt dadurch Wissenslücken.
- Das Modell beschreibt ein mögliches Vorgehen zur Überprüfung der Einhaltung von LRV Art. 15 Abs. 4a bis 4c ohne kontinuierliche Staubmessung durch Ermittlung einfach zu messender Hilfsgrössen. Das beschriebene Vorgehen erfasst jedoch erst einen Betrieb bei Volllast. Zur Abdeckung des Teillastbetriebs muss das Vorgehen ergänzt werden. Die Komplexität und der Aufwand werden bei Unterscheidung von Volllast und Teillast deutlich erhöht. Für Anlagen mit zwei oder mehr Holzfeuerungen, die über einen gemeinsamen Feinstaubabscheider verfügen, muss das Modell ebenfalls erweitert werden. Vor einer allfälligen Anwendung des Vorgehens ist somit eine Ausweitung des Modellansatzes erforderlich. Die oben aufgeführte generische Beschreibung des Vorgehens erlaubt jedoch eine Vorentscheidung, ob ein Vorgehen dieser Art in Frage kommt.

7 Methodik zur Überwachung von Staubabscheidern

7.1 Kontinuierliche Staubmessung (Variante 1, Referenz)

Messungen:

- Kontinuierliche Messung von Staub- und Sauerstoffgehalt (O₂) im Reingas

Berechnungen:

- Stündliche Berechnung von Stundenmittelwerten der bezüglich O₂ normierten Staubkonzentration, Abspeichern jedes Stundenmittelwertes.
- Tägliche Berechnung des Tagesmittelwertes der bezüglich O₂ normierten Staubkonzentration, Abspeichern jedes Tagesmittelwertes.

Auswertung nach LRV Art. 15, Abs. 4:

- Ziff a: Tagesmittel Grenzwert übers Jahr zu 100% erfüllt
- Ziff b: Stundenmittel 1,2-facher Grenzwert übers Jahr zu 97% erfüllt
- Ziff c: Stundenmittel 2-facher Grenzwert übers Jahr zu 100% erfüllt
- Option: Berechnung des zeitlichen Anteils an Grenzwertüberschreitung für Ziff a bis c.

Kosten einmalig:

- Hardware > 50'000.–
- Software > 5'000.–

Kosten wiederkehrend:

- Auswertung mittel

Zuverlässigkeit der Bewertung:

- sehr hoch.

7.2 Periodische Staubmessung und kontinuierliche Zustandserfassung (Variante 2)

Messungen:

- Alle 2 Jahre Messung von Staub und Sauerstoffgehalt (O₂) im Reingas und Rohgas sowie des Abgasvolumenstroms
- Option 1: Volllast/Teillast
- Option 2: mit/ohne Filterabreinigung
- Alle 2 Jahre Dichtheitsprüfung Bypass (sofern vorhanden)
- Kontinuierliche Messung von verlässlichem Betriebssignal Holzfeuerung EIN (voraussichtlich Zuluftgebläse EIN/AUS und Abgasventilator EIN/AUS) und synchron dazu:
- Kontinuierliche Messung von verlässlichem Betriebssignal Staubabscheider EIN (voraussichtlich Bypass AUF/ZU und/oder Hochspannung EIN/AUS)

Berechnungen:

- Berechnung der Staubkonzentration aus den Betriebsdaten von Holzfeuerung und Staubabscheidung unter Annahme des Staubgehalts im Rohgas und Reingas sowie des Abgasvolumenstroms (Volllast/Teillast).
- Kontinuierliche Berechnung der stündlichen, täglichen und jährlichen Verfügbarkeit des Staubabscheiders während Holzfeuerung EIN.
- Stündliche Berechnung von Stundenmittelwerten der Staubkonzentration, Abspeichern jedes Stundenmittelwertes.

- Tägliche Berechnung des Tagesmittelwertes der Staubkonzentration, Abspeichern jedes Tagesmittelwertes.

Auswertung nach LRV Art. 15, Abs. 4: (Wie Variante 1)

Kosten einmalig:

- Hardware < 10'000.–
- Software > 5'000.–

Kosten wiederkehrend:

- Emissionskontrolle alle zwei Jahre: 1'500.–/a bis 2'500.–/a
- Auswertung mittel

Zuverlässigkeit der Bewertung:

- hoch

7.3 Periodische Staubmessung und kontinuierliche Betriebsstundenerfassung (Variante 3)

Messungen:

- Alle 2 Jahre Messung von Staub- und Sauerstoffgehalt (O₂) im Rein- und Rohgas sowie des Abgasvolumenstroms. Option: Volllast/Teillast
- Kontinuierliche Erfassung Betriebsstundenzähler Holzfeuerung EIN (Zuluftgebläse) und synchron dazu:
- Kontinuierliche Erfassung Betriebsstundenzähler Staubabscheider EIN

Berechnungen: (wie Variante 2)

Auswertung nach LRV Art. 15, Abs. 4: (wie Variante 2)

Kosten einmalig: (wie Variante 2)

Kosten wiederkehrend: (wie Variante 2)

Zuverlässigkeit der Bewertung:

- mittel

7.4 Periodische Staubmessung und kontinuierliche Betriebsstundenerfassung (Variante 4)

Messungen:

- Alle 2 Jahre Messung von Staub- und Sauerstoffgehalt (O₂) im Rein- und Rohgas sowie des Abgasvolumenstroms. Option: Volllast/Teillast
- Jährliche Ablesung Betriebsstundenzähler Holzfeuerung EIN (Zuluftgebläse)
- Jährliche Ablesung Betriebsstundenzähler Staubabscheider EIN (Zähler nur aktiviert, wenn gleichzeitig Holzfeuerung EIN ist)

Berechnungen:

- Berechnung der jährlichen Verfügbarkeit des Staubabscheiders während Holzfeuerung EIN, Vergleich mit der notwendigen Mindest-Verfügbarkeit
- Berechnung eines Jahresmittels der Staubkonzentration.

Auswertung nach LRV Art. 15, Abs. 4:

- keine.

Kosten einmalig:

- Hardware < 2'000.–

Kosten wiederkehrend:

- Emissionskontrolle alle zwei Jahre: 1'500.–/a bis 2'500.–/a
- Auswertung gering

Zuverlässigkeit der Bewertung:

- gering.

7.5 Übersicht und Bewertung aller Verfahren

Tabelle 6 Übersicht zur Methodik zur Überwachung von Staubabscheidern.

Variante	Basis LRV		Periode	Basis LRV und Massnahme	Investition	Aufwand p.a. wiederkehrend	Bewertung Zuverlässigkeit	
Var. 1	Art. 13	Abs. 4	permanent	"erhebliche Emissionen" -> kontinuierliche Messung	-	-	sehr hoch	
	Art. 14	Abs. 1	permanent	"wichtige Betriebszustände" erfasst -> erfüllt mit kont. Messung	-	-	sehr hoch	
	Art. 15	Abs. 4	permanent	"kontinuierliche Messung" von Staub und O ₂ , Normierung, Berechnung von Stunden- und Tagesmittelwerten, Auswertungen:	Hardware > 5'000.-	mittel	sehr hoch	
			Ziff a	jährlich	Tagesmittel Grenzwert 100% erfüllt	Software	mittel	sehr hoch
			Ziff b	jährlich	Stundenmittel 1,2-facher Grenzwert 97% erfüllt	> 5'000.-	mittel	sehr hoch
Ziff c	jährlich	Stundenmittel 2-facher Grenzwert 100% erfüllt		mittel	sehr hoch			
Var. 2	Art. 13	Abs. 3	2 Jahre	"Messung oder Kontrolle bei Feuerungen alle zwei Jahre"	-	< 1'000.-	hoch	
	Art. 14	Abs. 1	2 Jahre	"wichtige Betriebszustände" erfasst, deshalb Standardmessung (Reingas)		-	hoch	
			2 Jahre	-> und/oder Messung inkl. Abreinigung		0 bis < 500.-	mittel	
			2 Jahre	-> und Messung Rohgasemission oder Bypass oder Abscheider aus		0 bis < 500.-	mittel	
			2 Jahre	-> Option: Vollast und Teillast		< 500.-	mittel	
	Art. 13	Abs. 4	permanent	"kontinuierliche Messung ... einer anderen Betriebsgrösse"	-	-	-	
			permanent	-> Betriebssignal Holzfeuerung EIN: Zuluftventilator	aus SPS	mittel	hoch	
			permanent	-> Option: Lastzustand	aus SPS	mittel	mittel	
			permanent	-> Option: Abgastemperatur bei Holzfeuerung	aus SPS	mittel	mittel	
			2 Jahre	-> Bypass sofern vorhanden: Dichtheitsprüfung		mittel	mittel	
			permanent	-> Bypass sofern vorhanden: Signal Klappenstellung	aus SPS	mittel	hoch	
			permanent	-> Betriebssignal Staubabscheider EIN:	aus SPS	mittel	mittel	
			permanent	-> a) für Elektroabscheider aa) Spannung	< 1'000.-	mittel	hoch	
			permanent	oder ab) Strom	< 1'000.-	mittel	hoch	
			permanent	-> b) für Gewebefilter Druckverlust	< 1'000.-	mittel	hoch	
permanent	-> c) Abgastemperatur beim Abscheider	< 1'000.-	mittel	mittel				
a) & b) & c)	Art. 15	Abs. 4	permanent	kontinuierliche Berechnung von Stunden- und Tagesmittelwerten, Auswertungen:		mittel	Produkt	
			Ziff a	jährlich	Tagesmittel Grenzwert 100% erfüllt	Software	mittel	Produkt
			Ziff b	jährlich	Stundenmittel 1,2-facher Grenzwert 97% erfüllt	> 5'000.-	mittel	Produkt
Ziff c	jährlich	Stundenmittel 2-facher Grenzwert 100% erfüllt		mittel	Produkt			
Var. 3	Art. 13	Abs. 3	2 Jahre	"Messung oder Kontrolle bei Feuerungen alle zwei Jahre"	-	< 1'000.-	hoch	
	Art. 14	Abs. 1	2 Jahre	"wichtige Betriebszustände" erfasst, deshalb Standardmessung (Reingas)		-	hoch	
			2 Jahre	-> und/oder Messung inkl. Abreinigung		0 bis < 500.-	mittel	
			2 Jahre	-> und Messung Rohgasemission oder Bypass oder Abscheider aus		0 bis < 500.-	mittel	
			2 Jahre	-> Option: Vollast und Teillast		< 500.-	mittel	
	Art. 13	Abs. 4	permanent	"kontinuierliche Messung ... einer anderen Betriebsgrösse"	-	-	-	
			permanent	-> Betriebsstundenzähler Holzfeuerung EIN: Zuluftventilator	< 500.-	gering	hoch	
			permanent	-> Betriebsstundenzähler Staubabscheider EIN	< 500.-	gering	mittel	
	Art. 15	Abs. 4	jährlich	Berechnung der jährlichen Verfügbarkeit des Staubabscheiders, Auswertungen, Vergleich mit Mindest-Verfügbarkeit:		gering	gering	
			Ziff a	jährlich	Mindest-Verfügbarkeit im Tagesmittel 1-facher Grenzwert erfüllt	Software	gering	gering
Ziff b			jährlich	Mindest-Verfügbarkeit im Stundenmittel 1,2-facher Grenzwert erfüllt	< 500.-	gering	gering	
Ziff c			jährlich	Mindest-Verfügbarkeit im Stundenmittel 2-facher Grenzwert erfüllt		gering	gering	
Var. 4	Art. 13	Abs. 3	2 Jahre	"Messung oder Kontrolle bei Feuerungen alle zwei Jahre"	-	< 1'000.-	hoch	
	Art. 14	Abs. 1	2 Jahre	"wichtige Betriebszustände" erfasst, deshalb Standardmessung (Reingas)		-	hoch	
			2 Jahre	-> und Messung Rohgasemission oder Bypass oder Abscheider aus		0 bis < 500.-	mittel	
	Art. 13	Abs. 4	permanent	"kontinuierliche Messung ... einer anderen Betriebsgrösse"	-	-	-	
			permanent	-> Betriebsstundenzähler Holzfeuerung EIN: Zuluftventilator	< 500.-	gering	hoch	
permanent	-> Betriebsstundenzähler Staubabscheider EIN ¹⁾	< 500.-	gering	mittel				
Art. 15	Abs. 4	jährlich	Jährliche Verfügbarkeit des Staubabscheiders, Vergleich mit notwendiger Mindest-Verfügbarkeit		gering	gering		

1) nur aktiv falls gleichzeitig Holzfeuerung EIN

8 Empfehlungen

8.1 Anlagenbetrieb

Vorab wird empfohlen, dass in der Praxis gute Voraussetzungen für einen emissionsarmen Betrieb von automatischen Holzfeuerungen sichergestellt werden. Diese umfassen folgende Punkte:

1. Emissionsarmer Betrieb von automatischen Holzfeuerungen

- Neuanlagen: Frühzeitige Anwendung von QM Holzheizwerke in der Planungsphase, Betriebsoptimierung im ersten Betriebsjahr, jährlicher Service durch Feuerungslieferanten oder bei markanter Veränderung der Brennstoffeigenschaften (Wassergehalt, Stückigkeit, Feinanteil etc.) gegenüber dem Referenzbrennstoff
- Altanlagen: Jährlicher Service durch Feuerungslieferanten oder bei markanter Abweichung der Brennstoffeigenschaften (Wassergehalt, Stückigkeit, Feinanteil etc.) vom Referenzbrennstoff
- Optimierung der Anfahr- und Ausbrandphasen
- Nachrüsten eines technischen Speichers mit geeigneter Speicherladeregelung prüfen (Verminderung der Anzahl EIN/AUS-Phasen)
- Regelmässige Instandhaltung und Instandstellung (Unterhalt und Wartung).

2. Optimaler Betrieb von Staubabscheidern

- Neuanlagen: Frühzeitige Anwendung von QM Holzheizwerke in der Planungsphase, optimale Auswahl und Auslegung des Staubabscheiders (auch bei Mehr-Holzesselanlagen)
- Überwachungs-/Messsignal verlangen, dass Staubabscheider bei Feuerungsbetrieb eingeschaltet ist und Bypass (falls vorhanden) geschlossen und dicht ist
- Regel- und Einstellparameter des Staubabscheiders überprüfen, optimieren und protokollieren
- Regelmässige Instandhaltung und Instandstellung (Unterhalt und Wartung).

8.2 Überwachung

Für den Nachweis der Einhaltung von Staubgrenzwerten nach Luftreinhalte-Verordnung werden folgende Varianten gemäss Tabelle 6 empfohlen:

- Variante 1 (**Referenz**): **Kontinuierliche Messung** des Staub- und O₂-Gehalts, Berechnung und Nachweis der Einhaltung von Tages- und Stundenmittelwerten gemäss LRV Art. 15, Abs 4a bis 4c. Dabei wird empfohlen, dass die Anfahr- und Ausbrandphasen berücksichtigt werden (LRV Art. 15, Abs 5). Die Art der **Berücksichtigung der Anfahr- und Ausbrandphasen** kann gegebenenfalls noch präzisiert werden. Ohne Präzisierung sind die Anfahr- und Ausbrandphasen ungewichtet zu bewerten. Da die Abgasvolumenströme während dieser Phasen reduziert sind, ist diese Bewertung bezüglich Einhaltung der Emissionsgrenzwerte auf der sicheren Seite.

Mit heute etablierter Messtechnik verursacht das beschriebene Referenzverfahren für kleine und mittlere Anlagen unverhältnismässig hohe Kosten. Aus diesem Grund wird empfohlen,

eine vereinfachte Kontrolle auf Basis des beschriebenen Modellansatzes über eine **Ab-schätzung der Jahresfrachten** einzuführen. Dazu kommen folgende Varianten in Frage:

- Variante 2 bis 4: **Periodische Messung des Staub- und O₂-Gehalts kombiniert mit kontinuierlicher Messung ausgewählter Betriebsgrößen** (LRV Art. 13, 4), entweder einzelner Zustandsgrößen (Variante 2) oder lediglich der wesentlichen Betriebsstundenzähler (Varianten 3 und 4). Auf Basis der erfassten Daten und mit Annahmen über Rohgasgehalt (aufgrund der periodischen Messung) und Leistung der Feuerung wird die Einhaltung von Tages- und Stundenmittelwerten gemäss LRV Art. 15, Abs 4a bis 4c durch eine Ersatz-Bewertung der Einhaltung eines Jahresmittelwerts ersetzt. Dies wird vorgeschlagen, weil der Jahresmittelwert als prioritäre Zielsetzung betrachtet wird. Allerdings wird die Einhaltung der Einzelanforderung damit nicht garantiert, weshalb aus formalen Gründen vorgeschlagen wird, dass im Grundsatz die Einzelanforderungen nach LRV Art. 15 nachzuweisen sind, dass dies aber für kleine und mittlere Anlagen in der Regel als gegeben angenommen wird, wenn die Ersatzanforderung des Jahresmittelwerts erfüllt ist. Damit besteht zum Beispiel die Möglichkeit, bei Klagen infolge übermässiger temporärer Emissionen weitere Massnahmen einzuleiten.
- Vor Einführung eines dieser Verfahren 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.
- Begleitend zur Einführung wird empfohlen, die realen Auswirkungen der verschiedenen Betriebszustände auf ausgewählten **Praxisanlagen** mit punktuellen Messungen zu erheben. Auf Basis dieser Messungen kann in der Folge eine Sensitivitätsbetrachtung zum Einfluss der wichtigsten Betriebszustände durchgeführt werden. Das Verfahren kann dadurch unter Umständen weiter vereinfacht werden, indem allenfalls einzelne Unterscheidungen im Modell vernachlässigt werden, sofern die Messungen zeigen, dass ihr Einfluss auf das Gesamtergebnis bei typischen Praxisverhältnissen gering ist. Gleichzeitig kann aufgrund der Erhebungen auch abgeschätzt werden, welche Faktoren das Gesamtergebnis bei Praxisanlagen besonders stark beeinflussen, so dass auf deren Erhebung höheres Gewicht gelegt wird.
- Daneben ist anzustreben, dass begleitend oder zu einem späteren Zeitpunkt eine Erfolgskontrolle der Methodik durch einen direkten **Vergleich mit dem Referenzverfahren** mit kontinuierlicher Staubmessung an einer oder mehreren ausgewählten Anlagen durchgeführt wird. Solche Referenzmessungen müssen nicht zwingend an einer Praxisanlage durchgeführt werden, sondern können auch in einem Labor erfolgen, welches über die notwendigen Einrichtungen verfügt und in dem der Praxisbetrieb einer automatischen Heizanlage simuliert wird.
- Aufgrund der in der ersten Überwachungsperiode und bei begleitenden Untersuchungen gemachten Erfahrungen kann das Modell in der Folge kontinuierlich angepasst und verfeinert werden, wobei die Aussagekraft möglicherweise bei gleichbleibendem Erhebungsaufwand weiter erhöht werden kann.

9 Literatur

QM Holzheizwerke: Good, J. et al: *Planungshandbuch, Band 4 der Schriftenreihe QM Holzheizwerke*, C.A.R.M.E.N. e.V., Straubing 2004, ISBN 3-937441-94-8

LRV: Luftreinhalte-Verordnung (LRV) vom 16. Dezember 1985 (Stand am 1. September 2007), Artikel 814.318.142.1, der Schweizerische Bundesrat, Bern 2007

Verdankung

Die vorliegende Studie entstand im Auftrag des Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL) des Kantons Zürich.

