

## Feinstaubemissionen moderner Heizkessel

### Kurzfassung

Partikelemissionen von Heizkesseln werden üblicherweise bei konstanter Feuerungsleistung und im Dauerbetrieb der Anlagen ermittelt. Dieser Betriebszustand ist jedoch für die üblichen Einsatzbedingungen von Heizkesseln zur Gebäudebeheizung nicht repräsentativ. In der Realität schwankt der vom Heizkessel abzudeckende Wärmebedarf sowohl jahreszeitlich als auch täglich stark und hängt vor allem von der Außentemperatur und dem Nutzerverhalten ab. Die volle Auslastung des Kessels wird nur für vergleichsweise wenige Stunden pro Jahr erreicht. In der restlichen Zeit führt der geringere Wärmebedarf des Gebäudes zu einem taktenden, instationären Ein-Aus- bzw. zum modulierenden Betrieb der Heizkessel.

In dieser Untersuchung wurden die Staubemissionen (Gesamtstaub) sowie die gasförmigen Emissionen von Heizkesseln im kleinen Leistungsbereich (ca. 20 kW) mit verschiedenen Brennstoffen (Heizöl EL Standard, Heizöl EL schwefelarm, Heizöl EL schwefelarm + 5 % FAME, Erdgas, Holzpellets) untersucht. Die Kessel wurden hierbei im stationären Dauerbetrieb und bei Betriebsweise mit verschiedenen Wärmebedarfsprofilen betrieben. Der überwiegende Anteil des Gesamtstaubes (90 % oder mehr) entfällt auf Partikel mit aerodynamischen Durchmessern  $< 10 \mu\text{m}$ .

Sowohl im stationären Dauerbetrieb als auch beim realitätsnahem Betrieb mit Wärmebedarfsprofilen und damit taktender Betriebsweise liegen die Staubemissionen bei der Ölfeuerung auf einem sehr niedrigen Niveau, ein Einfluss der Betriebsweise ist nicht erkennbar.

Beim Pelletkessel liegen die Staubkonzentrationen, durchweg höher als beim Öl- bzw. Gaskessel und nehmen auch beim Taktbetrieb gegenüber dem Dauerbetrieb zu. So liegen z.B. beim Pelletkessel die Gesamtstaubemissionen mit  $74 \text{ mg/kWh}_{\text{Hi}}$  beim Dauerbetrieb bei voller Auslastung und mit  $114 \text{ mg/kWh}_{\text{Hi}}$  beim Betrieb nach Wärmebedarfsprofil mit einer durchschnittlicher Kesselauslastung von 44 % deutlich höher als beim Ölkessel mit Heizöl EL schwefelarm ( $0,17 \text{ mg/kWh}_{\text{Hi}}$  beim Dauerbetrieb bei voller Auslastung und  $0,09 \text{ mg/kWh}_{\text{Hi}}$  beim Betrieb nach Wärmebedarfsprofil mit einer durchschnittlicher Kesselauslastung von 44 %).

Eine gegenüber dem Wärmebedarfsprofil mit durchschnittlicher Kesselauslastung von 44 % weiter verringerter Kesselauslastung (29 und 14 %) führt zu keinem erkennbaren Einfluss auf die Staubemissionen. Die Zunahme der Staubemissionen beim Betrieb des Pelletkessels nach den Wärmebedarfsprofilen im Vergleich zum stationärem Dauerbetrieb mit voller Leistung ist vor allem auf dessen ungünstiges Startverhalten zurück zu führen, hierbei sind die Emissionen in den einzelnen Wärmebedarfsprofilen ähnlich hoch. Dies liegt vor allem daran, dass sich die Anzahl der Startvorgänge zwischen den Wärmebedarfsprofilen nicht sehr deutlich unterscheiden (kalt:  $\sim 33$ , mild  $\sim 23$ ) und die Emissionen bei geringerem Wärmebedarf leicht zunehmen, wobei sich dann in der Summe beide Effekte in etwa ausgleichen.

## Einleitung

Partikelemissionen von Heizkesseln werden üblicherweise bei konstanter Feuerungsleistung und im Dauerbetrieb der Anlagen ermittelt. Dieser Betriebszustand ist jedoch für die üblichen Einsatzbedingungen von Heizkesseln zur Gebäudebeheizung nicht repräsentativ. In der Realität schwankt der vom Heizkessel abzudeckende Wärmebedarf sowohl jahreszeitlich als auch täglich stark. Die volle Auslastung des Kessels wird in der Praxis nur an vergleichsweise wenigen Stunden pro Jahr erreicht. In der restlichen Zeit führt der geringere Wärmebedarf des Gebäudes zu einem taktenden, instationären Start/Stop- bzw. zum modulierenden Betrieb der Heizkessel.

Im Rahmen dieser Untersuchung sollen die Feinstaubemissionen von Heizkesseln im kleinen Leistungsbereich (ca. 20 kW) für unterschiedliche Brennstoffe (Heizöl EL Standard, Heizöl EL schwefelarm, Heizöl EL schwefelarm + 5 % FAME (Fettsäuremethylester), Erdgas, Holzpellets) im stationären Betrieb bei Nennwärmeleistung und im Betrieb nach verschiedenen realitätsnahen Wärmebedarfsprofilen ermittelt werden.

## Untersuchte Heizkessel und Brennstoffe

Für die Untersuchungen mit Heizölen und Erdgas wurde ein moderner Niedertemperaturkessel mit witterungsgeführter Regelung und einer Nennwärmeleistung von 18 kW eingesetzt. Dieser wurde für den Heizölbetrieb mit einem Rezirkulationsbrenner (Blaubrenner) ausgerüstet. Beim Erdgasbetrieb wurde ein einstufiger Gas-Gebläsebrenner eingesetzt.

Der Pelletkessel ist ein Dreizug-Kessel mit Unterschubbrenner und integrierter Rücklaufanhebung mit einer Nennwärmeleistung von 20 kW. Die Zündung der Pellets erfolgt automatisch beim Kesselstart mit einer elektrischen Heizpatrone. Der Brennstoff wurde aus einem Tagesbehälter zur Brennerschnecke gefördert. Die Heizgaszüge werden regelmäßig automatisch mit Spiralfedern abgereinigt. Der Kessel besitzt ein Saugzuggebläse, welches in Abhängigkeit der Kesselleistung angesteuert wird. Die Anteile von Primär- und Sekundärluft sind bei dieser Kesselkonstruktion fest eingestellt, eine Verbrennungsregelung, z.B. mit Lambda-Sonde, ist nicht vorhanden. Primärluft wird im Bereich des Brenntellers zugegeben, die Sekundärluftzuführung erfolgt in ein Flammrohr. Die Anpassung der Wärmeleistung des Heizkessels an den Wärmebedarf erfolgt in Leistungsstufen.

Die Brenner- bzw. Kesseleinstellungen wurden entsprechend den Vorgaben der jeweiligen Brenner-/ Kesselhersteller vorgenommen.

Als Brennstoffe wurden beim Ölkessel Heizöl EL Standard, Heizöl EL schwefelarm, Heizöl EL schwefelarm + 5 % FAME, beim Gaskessel Erdgas H und beim Pelletskessel handelsübliche Holzpellets eingesetzt. In Tabelle 1 sind wesentliche Angaben zu den eingesetzten Brennstoffen aufgelistet.

Tabelle 1 Angaben zu den untersuchten Brennstoffen

Brennstoffe		Heizöl EL			Erdgas H	Holzpellets
		Standard	schwefelarm	schwefelarm + 5 % FAME		
Heizwert (H <sub>i</sub> )	[MJ/kg]	42,84	43,00	43,00	36,16	17,64
Brennwert (H <sub>s</sub> )	[MJ/kg]	45,70	45,91	45,97	40,05	19,06
Dichte bei 15 °C	[kg/m <sup>3</sup> ]	838,8	831,6	834,2	-	-
Viskosität bei 20 °C	[mm <sup>2</sup> /s]	4,24	3,91	4,013	-	-
Wassergehalt	[mg/kg]		42	71	-	
	Massen-%					6,9
Stickstoffgehalt	[mg/kg]	36,0	7,1	5,2	2,22	n.b. *
Schwefelgehalt	[% m/m]	0,0741	0,0009	0,001	0,0003	n.b. *
	[ppm]	741	9	10	ca. 3	-

\* n.b. nicht bestimmbar – Wert ist kleiner als Bestimmungsgrenze von 0,3 Massen-%

## Versuchsaufbau und Messverfahren

Zur Versuchsdurchführung wurden die Heizkessel an einen Wasserkreislauf angeschlossen, bei dem sowohl eine definierte Spreizung zwischen Vor- und Rücklauf-temperatur eingestellt als auch eine bestimmte Wärmeleistung abgeführt werden kann. Abbildung 1 zeigt die realisierte hydraulische Schaltung mit den notwendigen Mischern. Als Eingangsdaten für die Mischerregelung dienen die erfassten Temperaturen und der gemessene Volumenstrom. Die Einstellungen von Spreizung bzw. Wärmeleistung erfolgt über die Regelung der Rücklauf-temperatur bzw. des Kesselwasservolumenstromes.

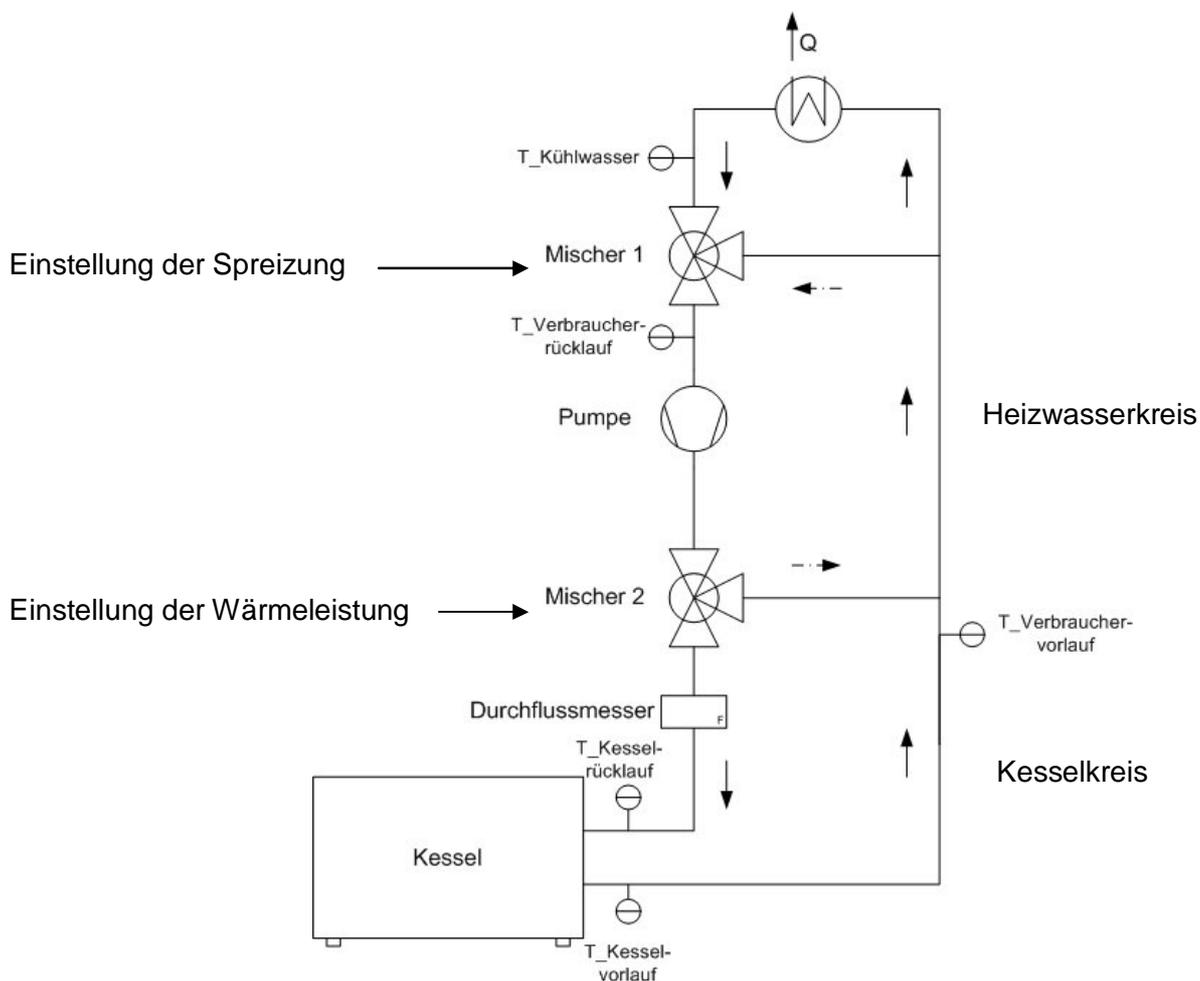


Abbildung 1 Schaltung des Wasserkreislaufes

## Versuchsdurchführung

Die Emissionen der untersuchten Heizkessel wurden beim Betrieb mit konstanter Leistung ohne Start/Stop-Vorgänge und beim Betrieb mit Wärmebedarfsprofilen bestimmt. Hierbei wurden gasförmige Emissionen und die Emissionen an Gesamtstaub ermittelt.

Die insgesamt im Jahr erreichten Betriebszeiten einer Heizung bei den einzelnen Kesselauslastungen teilen sich auf die einzelnen Heitztage entsprechend der Bandbreite und Häufigkeit der jährlichen Außentemperaturverteilung und des täglichen Außentemperaturverlaufs auf. Hierbei lassen sich für übliche Heizanlagen typische Tagesgänge des Heizenergiebedarfs zusammenstellen, die unterschiedliche Außentemporniveaus wiedergeben. Praxisuntersuchungen haben gezeigt, dass diese typischen Verläufe zwar im Detail und im Niveau von den örtlichen Gegebenheiten, wie z.B. Bauart und Betriebsweise der Heizanlage sowie von den Gebäudeeigenschaften abhängen, gewisse Grundzüge aber erhalten bleiben.

Diese bestehen darin, dass zu Beginn des Heiztages, bei niedrigen Außentemperaturen und ggf. relativ geringen Innenraumtemperaturen nach einer Nachtabsenkung, für eine gewisse Zeit die höchste Wärmeleistung benötigt wird. Im Tagesverlauf ansteigende Außentemperaturen, die zunehmende Erwärmung der Innenräume, innere Wärmequellen und ggf. solare Gewinne lassen den Heizbedarf kontinuierlich abnehmen. Gegen Abend, bei abnehmenden Außentemperaturen steigt der Heizbedarf wieder etwas an. Aufbauend auf den Ergebnissen der FfE-Studie wurden für die aktuellen Untersuchungen 3 Wärmebedarfsprofile festgelegt, die kalte, mittlere und milde Wintertage repräsentieren sollen, siehe Abbildung 2.

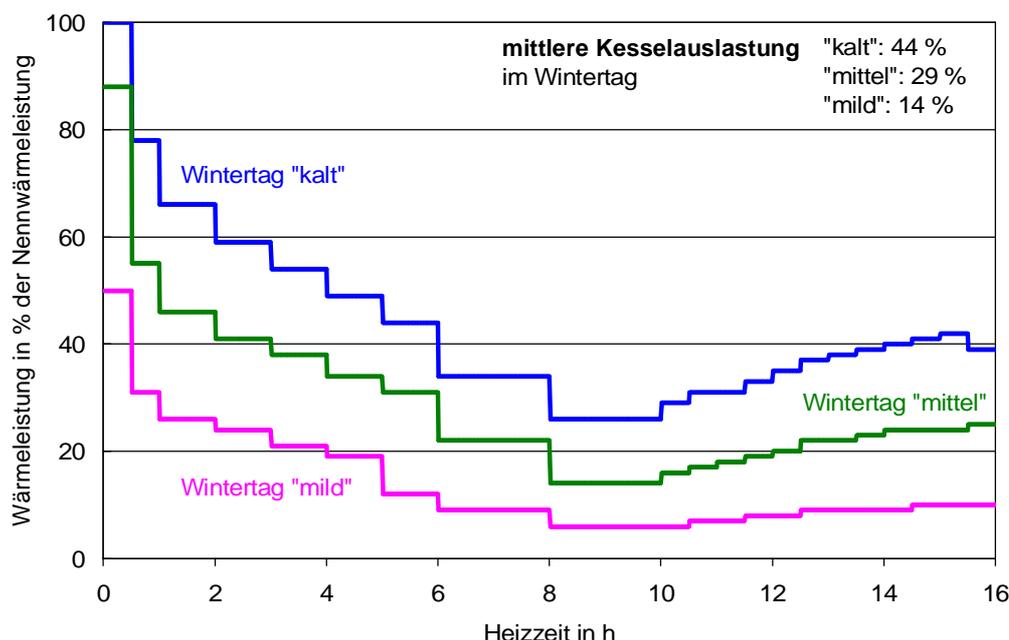


Abbildung 2 Wärmebedarfsprofile bei den Feinstaubemissionen an Heizkesseln (mittlere Kesselauslastung ist auf die Nennwärmeleistung bezogen)

Die Wärmebedarfsprofile wurden für einen angenommenen täglichen Heizbetrieb von 16 Stunden ohne Warmwassererzeugung definiert. In der Praxis entspricht dies einem Heizungsbetrieb mit Nachtabsenkung. Diese Heizlastkurven sind als beispielhafte Tagesverläufe der in einem Gebäude angeforderten Heizleistung zu verstehen. In der Praxis können die jeweiligen Heizlastkurven, je nach den örtlichen Gegebenheiten und dem Betreiber- und Nutzerverhalten, mehr oder weniger davon abweichen.

Bei der witterungsgeführten Regelung des Niedertemperaturkessels wurden für die Wärmebedarfsprofile jeweils Außentemperaturen, Vorlauftemperaturen und die Spreizungen festgelegt. Beim Pelletkessel ergibt sich die Vorlauftemperatur entsprechend dem aktuellen Betriebszustand im Bereich zwischen Mindestvorlauftemperatur (60 °C) und oberem Abschalt-punkt (~ 76°C). Die gewählten Temperaturen sowie die mittlere Kesselauslastung der Wärmebedarfsprofile sind in Tabelle 2 für die untersuchten Heizkessel zusammengestellt.

Tabelle 2 Mittlere Kesselauslastung, Spreizung sowie Außen- und Vorlauftemperaturen für die unterschiedlichen Wärmebedarfsprofile bei den untersuchten Heizkesseln

Wärmebedarfsprofil	Öl- bzw. Gaskessel und Pelletkessel		Öl- bzw. Gaskessel	
	mittlere Kesselauslastung in %	Spreizung in °C	Außentemperatur in °C	Vorlauftemperatur in °C
mild	14	7	13	30
mittel	29	13	5	40
kalt	44	15	-2	50

### Ergebnisse beim Ölkessel

Beispielhaft für die Versuche mit Heizöl EL zeigt die Abbildung 3 die Verläufe von gasförmigen Emissionen für 16 Stunden eines Versuches mit dem Wärmebedarfsprofil „kalt“. Zu Anfang sind aufgrund des höheren Wärmebedarfs längere Laufzeiten des Brenners ersichtlich. Im weiteren Versuch taktet der Kessel, da die Wärmeanforderung durch das vorgegebene Profil reduziert wird.

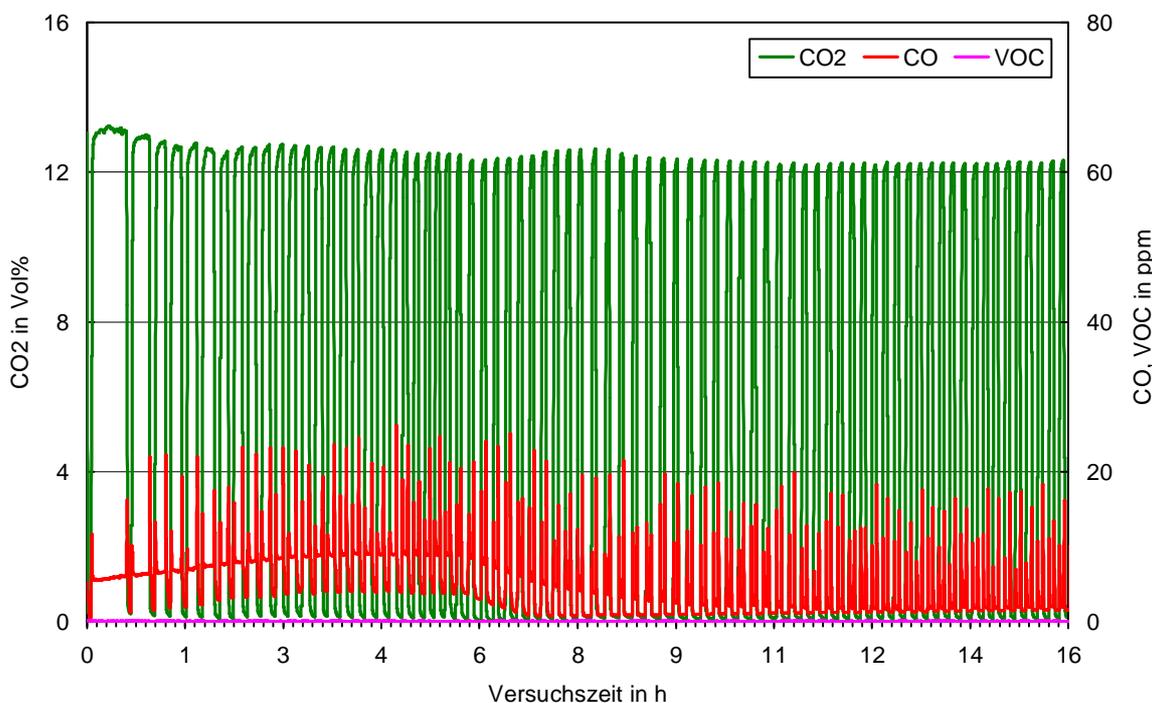


Abbildung 3 Beispielhafte Verläufe der CO<sub>2</sub>-, CO- und VOC-Konzentrationen beim Ölkessel und Betrieb mit dem Wärmebedarfsprofil „kalt“ (VOC: gasförmige organische Verbindungen)

In Tabelle 3 sind die ermittelten Gas- und Gesamtstaubkonzentrationen für den Dauerbetrieb des Ölkessels mit den unterschiedlichen Ölqualitäten und den Betrieb beim Wärmebedarfs-

profil „kalt“ aufgelistet. Die Gesamtstaubemissionen sind vom Schwefelgehalt des Brennstoffes abhängig und nehmen bei der schwefelarmen Qualität, gegenüber der Standardqualität, deutlich ab. Wird der schwefelarmen Qualität 5% FAME beigemischt, hat dies keine Auswirkungen auf die Staubemissionen. Bei schwefelhaltigen Brennstoffen bildet sich bei der Verbrennung neben Schwefeldioxid auch eine geringere Menge an Schwefeltrioxid, welches sich im abkühlenden Heizgas dann zu dampfförmiger Schwefelsäure umsetzt. Da diese bei Unterschreitung des Säuretaupunktes in Tröpfchenform vorliegt, ist sie Bestandteil der Staubemission und wird in der Tabelle als kondensierbarer Staub bezeichnet. Vor allem bei der HEL – Standardqualität, aber auch bei den schwefelarmen Qualitäten, besteht der weitest- grösste Teil des ermittelten Gesamtstaubs aus Schwefelsäure. Filterbarer Staub, der im wesentlichen aus Ruß- und in geringem Maße aus Aschepartikeln besteht, hat nur einen geringen Anteil an den Gesamtstaubemissionen.

Tabelle 3 Mittelwerte der Gas- und Staubemissionen beim Niedertemperatur-Heizkessel mit Ölbrenner für die untersuchten Ölqualitäten für den Dauerbetrieb und das Wärmebedarfsprofil „kalt“

Profil	O2 [%]	λ [-]	CO2 [%]	CO [mg/kWh]	NOx [mgNO <sub>2</sub> /kWh]	filterbarer Staub [mg/kWh]	kondensierbarer Staub [mg/kWh]	Gesamtstaub [mg/kWh]
<b>HEL - Standardqualität</b>								
dauer	4,4	1,3	12,2	7	80	0,06	1,35	1,41
kalt						0,05		1,40
<b>HEL - schwefelarme Qualität</b>								
dauer	5,0	1,3	11,7	9		0,09	0,08	0,17
kalt						0,01		0,09
<b>HEL - schwefelarme Qualität + 5% FAME</b>								
dauer	4,3	1,3	12,2	4		0,02	0,08	0,10
kalt						0,02		0,10

λ Luftüberschusszahl Lambda

## Ergebnisse beim Gaskessel

Für die Versuche mit Erdgas am Niedertemperaturkessel sind die Ergebnisse in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4 Gesamtstaubemissionen und Gaskonzentrationen im Dauerbetrieb für Erdgas H am Niedertemperaturkessel

Profil	O2 [%]	λ [-]	CO2 [%]	CO [mg/kWh]	NOx [mgNO <sub>2</sub> /kWh]	filterbarer Staub [mg/kWh]	kondensierbarer Staub [mg/kWh]	Gesamtstaub [mg/kWh]
<b>Erdgas H</b>								
dauer	4,2	1,3	9,3	57	48	0,002	0,032	0,034

λ Luftüberschusszahl Lambda

Aufgrund der geringen Staubkonzentrationen wurden nur Versuche im Dauerbetrieb durchgeführt. Der weitaus größte Anteil der Staubemission besteht bei der Gasverbrennung ebenfalls, wie beim Heizöl EL, aus kondensierter Schwefelsäure (kondensierbarer Staub), die sich im wesentlichen durch die Verbrennung des schwefelhaltigen Odorierungszusatzes im Erdgas bildet.

### Ergebnisse beim Pelletkessel

Beispielhaft für die Versuche mit Holzpellets zeigt die Abbildung 4 die Verläufe der Emissionen eines 16 Stunden-Versuches mit dem Wärmebedarfsprofil „kalt“. Knapp die erste Stunde des Versuchs lief der Kessel im Dauerbetrieb, danach taktet der Kessel, da die Wärmeanforderung durch das vorgegebene Profil reduziert wird.

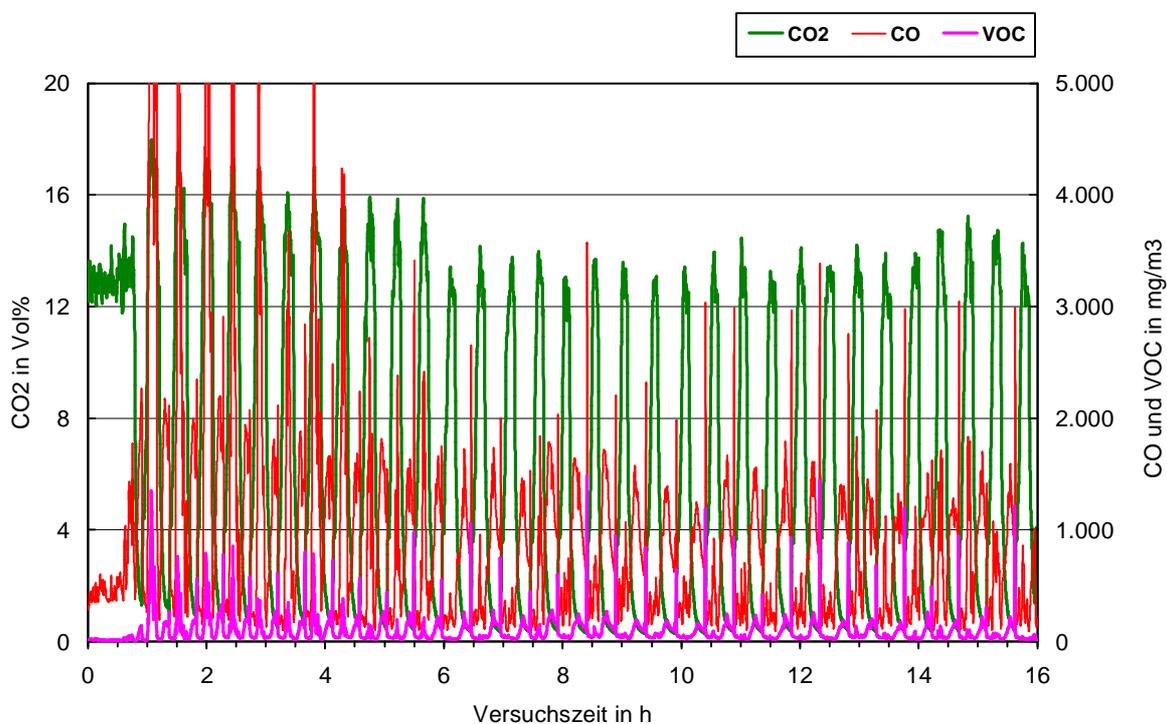


Abbildung 4 Beispielhafte Verläufe der CO<sub>2</sub>-, CO- und VOC-Konzentrationen beim Pelletkessel und Betrieb mit dem Wärmebedarfsprofil „kalt“

In Tabelle 5 sind die Versuchsergebnisse am Pelletkessel aufgelistet. Alle Versuche wurden mit der selben Pelletsqualität durchgeführt. Die angegebenen Emissionskonzentrationen für die Profile wurden anhand der Emissionsmassenströme und dem Abgasvolumenstrom berechnet.

Tabelle 5 Gemessene Gas- und Staubkonzentrationen beim Pelletkessel

Profil	O <sub>2</sub> [%]	$\lambda$ [-]	CO <sub>2</sub> [%]	CO [mg/kWh]	VOC [mgC/kWh]	NO <sub>x</sub> [mgNO <sub>2</sub> /kWh]	Gesamtstaub [mg/kWh]
<b>Holzpellets</b>							
dauer	7,8	1,5	12,6	658	20	262	74
kalt	14,5	3,2	6,4	3.052	333		114
mittel	15,6	3,8	5,3	3.082	320		110
mild	17,4	5,7	3,7	3.557	452		121

$\lambda$  Luftüberschusszahl Lambda

Beim Pelletkessel liegen die Staubkonzentrationen durchweg deutlich höher als beim Öl- bzw. Gaskessel und nehmen auch beim Betrieb nach Wärmebedarfsprofil gegenüber dem Dauerbetrieb zu. Für die untersuchten Wärmebedarfsprofile „kalt“, „mittel“ und „mild“ liegen die Staubkonzentrationen im Bereich von 115 mg/kWh. Ein Unterschied zwischen den Wärmebedarfsprofilen kalt/mittel/mild in Bezug auf die Staubemission ist nicht erkennbar. Die Zunahme der Staub-, CO- und VOC-Konzentrationen beim Betrieb des Pelletkessels nach Wärmebedarfsprofilen ist vor allem auf dessen Startverhalten zurück zu führen. Mit zunehmendem Abstand der Kesseltemperatur vom Sollwert wird, um die Kesselsolltemperatur möglichst schnell wieder zu erreichen, immer mehr Brennstoff auf den Brennteller gefördert. Da die Verbrennungsluftmengen nicht entsprechend angepasst werden, entstehen mehr oder weniger ausgeprägte Luftmangelsituationen, die zu einem Anstieg von Produkten unvollständiger Verbrennung führen. Allerdings unterscheiden sich die Emissionen in den einzelnen Wärmebedarfsprofilen kaum. Dies liegt vor allem daran, dass sich die Anzahl der Startvorgänge zwischen den Wärmebedarfsprofilen nicht sehr deutlich unterscheiden (kalt: ~ 33, mild ~ 23) und die Emissionen bei geringerem Wärmebedarf leicht zunehmen, wobei sich dann in der Summe beide Effekte in etwa ausgleichen.

## Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden die Staubemissionen (filterbarer und kondensierbarer) sowie die gasförmigen Emissionen von Heizkesseln im kleinen Leistungsbereich (ca. 20 kW) untersucht, die mit verschiedenen Brennstoffen (Heizöl EL Standard, Heizöl EL schwefelarm, Heizöl EL schwefelarm + 5 % FAME, Erdgas, Holzpellets) im stationären Betrieb bei Nennwärmeleistung und mit verschiedenen realitätsnahen Wärmebedarfsprofilen betrieben wurden. Der überwiegende Anteil der Staubemissionen (90 % oder mehr) entfällt auf Partikel mit aerodynamischen Durchmessern < 10  $\mu$ m.

Sowohl im stationären Dauerbetrieb als auch beim Betrieb mit Wärmebedarfsprofilen und damit taktender Betriebsweise liegen die Staubemissionen bei der Ölfeuerung auf einem sehr niedrigen Niveau, ein Einfluss der Betriebsweise ist nicht erkennbar. Bei der Gasfeuerung war, aufgrund der geringen Staubkonzentration im Abgas und der damit sich ergebenden langen Probenahmezeit, ein Betrieb mit Wärmebedarfsprofilen nicht durchführbar.

Als wesentliche Staubquelle haben sich bei beiden Brennstoffen die Schwefelsäuretröpfchen ergeben. Diese entstehen in geringer Konzentrationen aus der Umwandlung von Brennstoffschwefel in Schwefeltrioxid bzw. Schwefelsäure. Mit abnehmendem Schwefelgehalt im Heizöl nimmt auch die Staubemission ebenfalls ab. Bei schwefelarmen Heizölqualitäten (mit oder ohne Beimischung von FAME) liegen die Gesamtstaubemissionen in vergleichbarer Größenordnung wie bei Erdgas H.

Öl- und Gasfeuerungen sind hinsichtlich der gemessenen Emissionen gut vergleichbar, wobei sich leichte Vorteile beim Gas bezüglich der  $\text{NO}_x$ -Emissionen und beim Heizöl bezüglich der CO-Emissionen ergeben. Eine unterschiedliche Behandlung in der Gesetzgebung, z.B. in der 1. BImSchV, ist damit nicht begründbar. Allerdings ergeben sich bei diesen beiden Brennstoffen wesentliche Unterschiede zu Holzpellets.

So liegen z.B. beim Pelletkessel die Gesamtstaubemissionen mit 74  $\text{mg/kWh}_{\text{Hi}}$  beim Dauerbetrieb bei voller Auslastung und mit 114  $\text{mg/kWh}_{\text{Hi}}$  beim Betrieb nach Wärmebedarfsprofil mit einer durchschnittlicher Kesselauslastung von 44 % deutlich höher als beim Ölkessel mit Heizöl EL schwefelarm (0,17  $\text{mg/kWh}_{\text{Hi}}$  beim Dauerbetrieb bei voller Auslastung und 0,09  $\text{mg/kWh}_{\text{Hi}}$  beim Betrieb nach Wärmebedarfsprofil mit einer durchschnittlicher Kesselauslastung von 44 %). Die Gesamtstaubemissionen des Pelletkessels für die Profile kalt/mittel/mild liegen auf gleichem Niveau. Die Zunahme der Staubkonzentrationen bei taktender Betriebsweise des Pelletkessels ist vor allem auf dessen Startverhalten zurück zu führen. Mit zunehmendem Abstand der Kesseltemperatur vom Sollwert wird immer mehr Brennstoff auf den Brennteller gefördert. Da die Verbrennungsluftmengen nicht entsprechend angepasst werden, entstehen Luftmangelsituationen, die zu einem Anstieg von Produkten unvollständiger Verbrennung führen. Allerdings unterscheiden sich die Emissionen in den einzelnen Wärmebedarfsprofilen kaum. Dies liegt vor allem daran, dass sich die Anzahl der Startvorgänge zwischen den Wärmebedarfsprofilen nicht sehr deutlich unterscheiden (kalt: ~ 33, mild ~ 23) und die Emissionen bei geringerem Wärmebedarf leicht zunehmen, wobei sich dann in der Summe beide Effekte in etwa ausgleichen.

#### **Autoren:**

Dr.-Ing. Michael Struschka, Dipl.-Ing. Maike Springmann, Dipl.-Ing. Julia Goy, Dipl.-Ing. Christian Schäfer

Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK)  
(vormals: Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen – IVD)  
Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 23  
D-70569 Stuttgart  
Email: [michael.struschka@ifk.uni-stuttgart.de](mailto:michael.struschka@ifk.uni-stuttgart.de)  
Website: <http://www.ifk.uni-stuttgart.de>

  
Institut für wirtschaftliche  
Oelheizung e.V.

Die Untersuchungen wurden im Auftrag des Instituts für wirtschaftliche Oelheizung e. V. (IWO), Süderstraße 73 A, 20097 Hamburg durchgeführt