BAYERISCHES ZENTRUM FÜR
ANGEWANDTE ENERGIEFORSCHUNG E.V.

ZAE BAYERN

Konzeptverbesserung bei der Systemtechnik von Biomasse-Kleinfeuerungsanlagen

Optimierung von Biomasse-Kleinfeuerungssystemen durch hydraulisch-regelungstechnische Konzeptverbesserung und Entwicklung einer neuartigen sorptiven Wärmeauskopplung zur Erzielung hoher Effizienz und geringer Emissionen

Schlussbericht

Förderkennzeichen	03KB026
Laufzeit des Vorhabens	01.09.2009 – 30.11.2012

Mai 2013

Optimierung von Biomasse-Kleinfeuerungssystemen durch hydraulisch-regelungstechnische Konzeptverbesserung und Entwicklung einer neuartigen sorptiven Wärmeauskopplung zur Erzielung hoher Effizienz und geringer Emissionen

Zuwendungsgeber

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)
Referat KI III 2
Hannoversche Str. 28
101115 Berlin

Vertreten durch:

Projektträger Jülich (PTJ)
Zimmerstr. 26-27
10969 Berlin

Zuwendungsempfänger

Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e. V. (ZAE Bayern)

Abteilung 1: Technik für Energiesysteme und Erneuerbare Energien
Walther-Meißner-Str. 6
D - 85748 Garching

Wissenschaftliche Leiter: Prof. Dr.-Ing. Hartmut Spliethoff

Abteilungsleiter: Dr. Andreas Hauer

Autoren

Robert Kunde

Mamun Adeili

Dr. Jens M. Kuckelkorn

Kontakt: Dipl.-Ing. Robert Kunde, +49 89 329442-27, kunde@muc.zae.bayern.de

Datum 29. Mai 2013

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Inhalt

I Kurzdarstellung 4
1 Aufgabenstellung 4
2 Voraussetzungen bei der Vorhabendurchführung 4
3 Planung und Ablauf des Vorhabens 5
4 Wissenschaftlicher und technischer Stand 6
5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 7
II Eingehende Darstellung: Projektdurchführung und Ergebnisse 8
1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse 8
1.1 Jahresnutzungsgrad und der Jahresemissionen 8
1.1.1 Methodenentwicklung zur Bestimmung des Jahresnutzungsgrades und der Jahresemissionen 8
1.1.2 Ergebnisse zum Jahresnutzungsgrad 12
1.1.3 Ergebnisse zum Emissionsverhalten 17
1.2 Sorptive Wärmeauskopplung 21
1.2.1 Theoretische Vorüberlegungen 21
1.2.2 Aufbau der Laboranlage 25
1.2.3 Versuchsdurchführung 28
1.2.4 Ergebnisse der sorptiven Abgasentfeuchtung 30
1.2.5 Fazit zur sorptiven Wärmeauskopplung aus dem Abgas 36
2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises 36
3 Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeit 37
4 Nutzen und Verwertbarkeit 38
5 Vorhabenrelevante Erkenntnisse von dritter Seite 38
6 Veröffentlichungen 41
Literatur / Quellennachweis 42
A Anhang 45

I Kurzdarstellung

1 Aufgabenstellung

Das Vorhaben ist in zwei Arbeitspakete unterteilt. Im ersten Arbeitspaket (hydraulisch-regelungstechnische Konzeptverbesserung) werden systematische Untersuchungen zum Einfluss der hydraulischen Einbindung des Kessels in das gesamte Heizungssystem sowie der Regelungsstrategie auf den Jahresnutzungsgrad und das Emissionsverhalten durchgeführt. Dabei wird nicht der Heizkessel alleine sondern im Kontext des gesamten Heizungssystems untersucht. Anhand praxisorientierter Lastgänge werden zwei typische hydraulische Schaltungsvarianten (mit und ohne Pufferspeicher) an zwei unterschiedlichen (Unterschubfeuerung und Fallschachtfeuerung), marktüblichen Pellet-Kleinfeuerungsanlagen (KFA) inklusive Kesselregelung untersucht und beurteilt.

Untersuchungsziel im zweiten Arbeitspaket ist der Machbarkeitsnachweis für eine neuartige Wärmeauskopplung unter Einsatz eines hygroskopischen Wärmeträgermediums (z. B. LiCl). Die Funktionsfähigkeit der Wärmeauskopplung durch Abgasentfeuchtung auf Basis der Absorption soll im Labormaßstab untersucht werden. Der offene Absorptionsprozess mit einem hygroskopischen Arbeitsmittel ermöglicht eine effizientere Entfeuchtung im Vergleich zu bisherigen Systemen. Es kann ein Taupunkt von etwa 30 °C im Abgas erreicht werden, obwohl die Kühlmitteltemperatur (Netzrücklauf, Heizwasserrücklauf) deutlich darüber liegt. Mit dieser Technik wird die Brennstoffausnutzung erheblich erhöht, zusätzlich werden Staubpartikel aus dem Abgas mit dem zweistufigen Wäscherprinzip entfernt. Der überwiegende Teil der Absorptionswärme kann an das Wärmeträgermedium des Heizkreislaufes ausgekoppelt werden.

2 Voraussetzungen bei der Vorhabendurchführung

Durch die energetische Nutzung von Biomasse kann der Einsatz fossiler Energieträger und dadurch der Ausstoß von fossilem CO_2 signifikant reduziert werden.

Biomasse wird dabei vor allem in Form von Holz thermisch genutzt und in Heizwerken oder kleineren Feuerstätten eingesetzt. Vor allem aufgrund der Kostenerwartungen bei fossilen Energieträgern und der teilweisen Unabhängigkeit bei der Holznutzung ist die Heizungstechnik auf Basis von Holzpellets und Hackgut sehr beliebt. Die Nutzung steht auch im Einklang mit den energiepolitischen Zielen der EU und Deutschlands. Sie wird finanziell beispielsweise durch das Marktanreizprogramm unterstützt.

Aktuelle Untersuchungen zeigen, dass Biomasse-Kleinfeuerungen nennenswert zur Feinstaubbelastung beitragen. In Ballungsräumen und ländlichen Siedlungen beträgt die Immissionszusatzbelastung aufgrund von Biomasseverbrennung in Kleinanlagen bis zu 15 %

des Immissionsgrenzwertes (Tagesmittelwert 50 µg/m³, ab 2010 max. 7 Überschreitungstage zulässig) (KUNDE et al., 2007 und SCHNELLE-KREIS et al., 2008). Bei vielen Anlagen treten auch hohe Schadstoffemissionen (z. B. Kohlenstoffmonoxid) auf. Dies gilt besonders für Einzelraumfeuerungsanlagen aber auch für „moderne“ Pelletfeuerungen. Die Effizienz (Jahresnutzungsgrad) „moderner“ Pelletfeuerungen beträgt im Mittel nur etwa 70 – 75 %, zum Teil wird unerwartet viel Hilfsenergie verbraucht (KUNDE et al., 2009). Diese Ergebnisse stehen oft im Widerspruch zur allgemeinen Meinung über z. B. Pelletfeuerungen.

Zur optimalen Funktionsweise einer Zentralheizungsanlage muss das Gesamtsystem (Wärmeerzeuger, hydraulische Einbindung, Regelungstechnik, Wärmeverbraucher) betrachtet werden. Viele bestehende Holzpellet-Zentralheizungsanlagen funktionieren nach eigenen Untersuchungen aufgrund ungünstiger hydraulischer Einbindung und Regelungstechnik nicht optimal (KUNDE et al., 2008). Um das Optimierungspotential quantifizieren zu können, müssen typische Hydraulik- und Regelungskonfigurationen untersuchen werden. Anhand der Ergebnisse kann der Einfluss ungünstiger Systemtechnik auf die Effizienz und das Emissionsniveau beurteilt werden. Schließlich lassen sich in der Praxis handhabbare Verbesserungsvorschläge erarbeiten.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben ist in zwei Arbeitspakete unterteilt.

Im ersten Arbeitspaket (hydraulisch-regelungstechnische Konzeptverbesserung) werden systematische Untersuchungen zum Einfluss der hydraulischen Einbindung des Kessels in das gesamte Heizungssystem sowie der Regelungsstrategie auf den Jahresnutzungsgrad und das Emissionsverhalten durchgeführt.

Nach Recherche des aktuellen Stands der Technik wurde zunächst eine geeignete Methode erarbeitet, dann ein entsprechender Versuchsstand aufgebaut und anschließend Versuche an zwei unterschiedlichen Holzpellet-KFA durchgeführt.

Während der Vorhabenbearbeitung wurde der Arbeitsplan aufgrund neuer Erkenntnisse angepasst, um den förderpolitischen Zielen gerecht zu werden.

Wesentliches Vorhabenziel ist die Abschätzung des Optimierungspotentials, das sich aus der Effizienzsteigerung durch Maßnahmen zur Steigerung des Jahresnutzungsgrades ergibt.

Untersuchungsziel im zweiten Arbeitspaket ist der Machbarkeitsnachweis für eine neuartige Wärmeauskopplung unter Einsatz eines hygroskopischen Wärmeträgermediums (z. B. LiCl).

Um die Funktionsfähigkeit der Wärmeauskopplung durch Abgasentfeuchtung auf Basis der Absorption im Labormaßstab untersuchen zu können, wurden zunächst theoretische

Vorüberlegungen durchgeführt. Diese lieferten wesentliche Randbedingungen für den Aufbau einer Laboranlage. In dieser wurde als wichtigster Parameter untersucht, ob bei den für den Entfeuchtungsprozess notwendigen Temperaturen (ca. 400 °C) Dioxine durch den Kontakt des heißen Abgases aus der Biomasseverbrennung mit dem chlorhaltigen Sorptionsmittel gebildet werden. Mit der Laboranlage wurden Versuche mit LiCl-Feststoff (trockene Kontaktierung) und LiCl-Sole (nasse Kontaktierung) durchgeführt.

Der Projektzeitplan zur Vorgehensweise ist in Abbildung 3-1 abgedruckt.

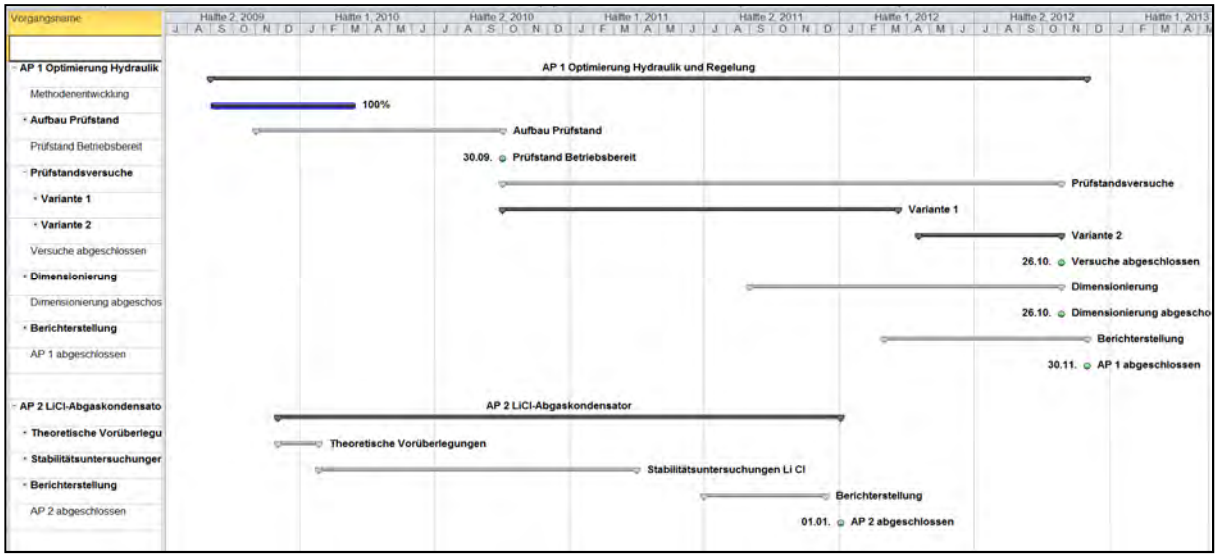


Abbildung 3-1: Projektzeitplan

4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Zu Vorhabenbeginn waren keine anderweitigen Untersuchungen bekannt, bei denen Jahresnutzungsgrade und Jahresemissionen von Pelletheizanlagen unter realer Betriebsweise am Versuchsstand ermittelt werden.

Vorangegangen waren eigene Untersuchungen zum Jahresnutzungsgrad von Pelletheizanlagen im realen Alltagsbetrieb (KUNDE et al., 2008), bei denen zumindest auch die gasförmigen Emissionen über einen längeren Zeitraum kontinuierlich gemessen und so die tatsächliche Emissionsfracht im praktischen Betrieb abgeschätzt werden konnte.

2009 wurden die Ergebnisse eigener Felduntersuchungen zum Jahresnutzungsgrad aus den Jahren 2007 und 2008 veröffentlicht (KUNDE et al., 2009).

Nahezu zeitgleich wurden vom European Institute for Energy Reaserch (EIFER) weitere Felduntersuchungen zum Jahresnutzungsgrad durchgeführt. Diese führten zu ähnlichen Ergebnissen und wurden von SCHRAUBE et al. (2011) veröffentlicht.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Fast zeitgleich zum hier beschriebenen Vorhaben wurde von bioenergy2020+ (Österreich) und TFZ Straubing (Deutschland) ein 8+8-stündiger Versuchszyklus entwickelt, um am Prüfstand Jahresnormnutzungsgrade und Emissionsfaktoren ermitteln zu können (HECKMANN et al., 2010).

Diese Methode unterscheidet sich in verschiedener Hinsicht von der im Rahmen dieses Vorhabens entwickelten Methode. Aufgrund der vergleichsweise kurzen Dauer des Versuchszyklus können aus den Untersuchungen mit dem 8+8-stündigen Versuchszyklus keine detaillierten Informationen über Emissionssituation und Energieeffizienz bei bestimmter Wärmenachfrage, beispielsweise an einzelnen Tagen mit besonders niedrigem Wärmebedarf, abgeleitet werden. Die Methode berücksichtigt bisher nur den Heizkessel alleine, nicht jedoch das gesamte Heizsystem z. B. einschließlich Pufferspeicher. Jahresemissionen unter realer Betriebsweise können deshalb nach jener Methode nicht ermittelt werden.

Unabhängig davon fand mit beiden o. g. Stellen ein regelmäßiger reger Erfahrungsaustausch auf Arbeitsebene statt.

II Eingehende Darstellung: Projektdurchführung und Ergebnisse

1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Die Zuwendung wurde im Sinne des Bewilligungsbescheides zur Bearbeitung der vorgenannten Aufgabenstellung (siehe auch Kap. I) verwendet.

In Arbeitspaket 1 wurde die Betriebsweise von Pellet-KFA für charakteristische Typtage am Laborprüfstand untersucht. Für jeden Typtag wurden kontinuierliche Emissionsmessungen für Gesamtstaub und Kohlenmonoxid durchgeführt und das Tages-Gesamtabgasvolumen ermittelt. Der Nutzungsgrad wurde anhand der erzeugten Nutzwärme in Bezug auf die Brennstoff- und elektrische Hilfsenergie bestimmt. Durch eine nutzwärme- und typtaghäufigkeitsgewichtete Summation wurde der Jahresnutzungsgrad ermittelt. Die Jahresemissionen wurden aus den Typtag-Gesamtemissionen und der Häufigkeit der verschiedenen Typtage abgeleitet.

Im Arbeitspaket 2 wurde das energetische Potential der sorptiven Wärmeauskopplung bei der Biomasseverbrennung anhand von Simulationsrechnungen beurteilt. Daraufhin wurde eine Laboranlage für Untersuchungen zur sorptiven Wärmeauskopplung aufgebaut. An dieser wurde untersucht, ob und in welchem Umfang bei der Verwendung von LiCl als Sorptionsmittel Dioxin- und Furanemissionen auftreten.

1.1 Jahresnutzungsgrad und der Jahresemissionen

1.1.1 Methodenentwicklung zur Bestimmung des Jahresnutzungsgrades und der Jahresemissionen

Die Untersuchungen zum Jahresnutzungsgrad und den Jahresemissionen wurden an einem Laborprüfstand mit Messmöglichkeiten für gas- und partikelförmige Emissionen inklusive Hydraulik (Pufferspeicher, regelbare Wärmesenke zur Heizkreissimulation) durchgeführt. Am hierfür entwickelten Laborprüfstand kann der reale Wärmebedarf, der sich aus Lastgängen ergibt, dynamisch nachgefragt werden. Dies ermöglicht die Untersuchung von Heizkesseln unter realer Betriebsweise. In Abbildung 1-1 ist das vereinfachte Hydraulikschema des Prüfstands sowie die Systemgrenze dargestellt.

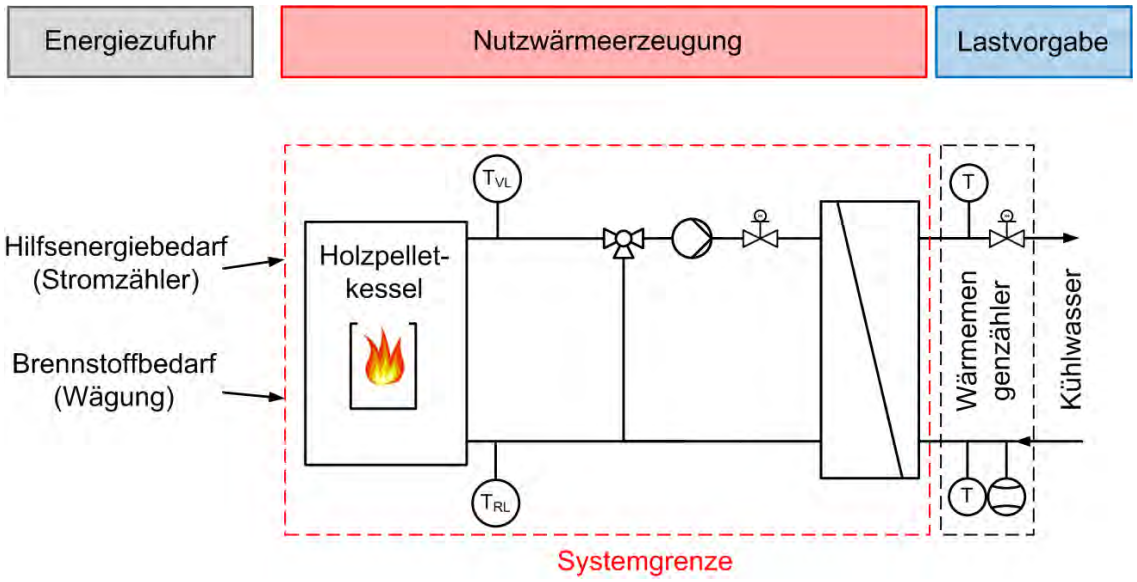


Abbildung 1-1: vereinfachtes Hydraulikschema und Systemgrenze

Unter Berücksichtigung bereits vorhandener Daten aus Felduntersuchungen wurden mit einer dynamischen Gebäudesimulation (TRNSYS) Lastgang und Jahresheizwärmebedarf eines üblichen Bestands-Einfamilienhauses ermittelt, für das nach DIN EN 12831 (2008) zur Deckung dieses Wärmebedarfs ein 15-kW-Kessel ausreichend wäre. Zugrunde liegt ein von drei Personen bewohntes Bestands-Einfamilienhaus in Deutschland mit 130 m² Wohnfläche, einem Heizwärmebedarf von 28 200 kWh/a und 3 150 kWh/a Energiebedarf für Warmwasser inklusiv typischer Zirkulationsverluste. Dies entspricht einem für den Gebäudebestand (ohne Wärmedämmung) durchschnittlichen spezifischen Gesamtwärmebedarf von etwa 240 kWh/m²a.

Mit der TRNSYS-Simulation wurde der Jahresheizwärmebedarf in 15-Minuten-Zeitschritten anhand einer mittleren Meteonorm-Testreferenzmeteorologie für Deutschland für dieses Bestands-Einfamilienhaus berechnet. Durch Addition des Wärmebedarfs für die Warmwasserbereitung (1 x tägliches Aufheizen eines 300 Liter Warmwasserspeichers inklusiv typischer Verteilverluste) ergibt sich der Jahresgesamtwärmebedarf in 15-Minuten-Zeitschritten. Das zugrundeliegende meteorologische Testreferenzjahr wurde nach der Richtlinie VDI 4655 (2008) in charakteristische Typtage eingeteilt und der Jahreslastgang dadurch in charakteristische Typtag-Lastgänge überführt.

Die Typtage „Winter heiter“ und „Sommer heiter“ fallen aufgrund der vergleichsweise niedrigen Häufigkeit kaum ins Gewicht. Für den Sommer kann angenommen werden, dass an beiden Typtagen „Sommer heiter“ und „Sommer bewölkt“ nur Warmwasser bereitet wird. Daher können diese beiden Typtage zusammengefasst werden. Der Typtag „Winter heiter“ (10 Tage im Jahr) kann in der Weise berücksichtigt werden,

indem die Häufigkeit jeweils zur Hälfte den Typtagen „Winter bewölkt“ und „Übergang bewölkt“ zugeschlagen wird. Der Fehler hinsichtlich des Energieumsatzes (Differenz 6 kWh/a, Übereinstimmung 99.98 % gegenüber der TRNSYS-Simulation) ist vernachlässigbar.

Aufgrund dieser Überlegung werden vier charakteristische Tageslastprofile mit entsprechenden Typtag-Lastgängen unterschieden, die in Abbildung 1-2 dargestellt sind.

Tabelle 1: Kriterien und Ergebnisse der Typtagdefinition in Anlehnung an VDI 4655

Typtag	Kurz	Außentemperatur	Einstrahlung	Häufigkeit	Wärmebedarf	
TRNSYS				**365**	**31.350**	**kWh/a**
VDI 4655:						
Winter bewölkt	WB	T < 5°C	X < 450 kJ/hm²	103	171,33	kWh/d
Winter heiter	WH	T < 5°C	X > 450 kJ/hm²	10	132,1	kWh/d
Übergang bewölkt	ÜB	5°C < T < 15°C	X < 450 kJ/hm²	87	87,63	kWh/d
Übergang heiter	ÜH	5°C < T < 15°C	X > 450 kJ/hm²	70	55,38	kWh/d
Sommer bewölkt	SB	T > 15 °C	X < 450 kJ/hm²	75	9,5	kWh/d
Sommer heiter	SH	T > 15 °C	X > 450 kJ/hm²	20	9,5	kWh/d
Summe				**365**	**31.371**	**kWh/a**
Auswahl:						
Winter	W	T < 5°C	X < 450 kJ/hm²	108	171,33	kWh/d
Übergang bewölkt	ÜB	5°C < T < 15°C	X < 450 kJ/hm²	92	87,63	kWh/d
Übergang heiter	ÜH	5°C < T < 15°C	X > 450 kJ/hm²	70	55,38	kWh/d
Sommer	S	T > 15 °C	X < 450 kJ/hm²	95	9,5	kWh/d
Summe "4 Typtage"				**365**	**31.344**	**kWh/a**

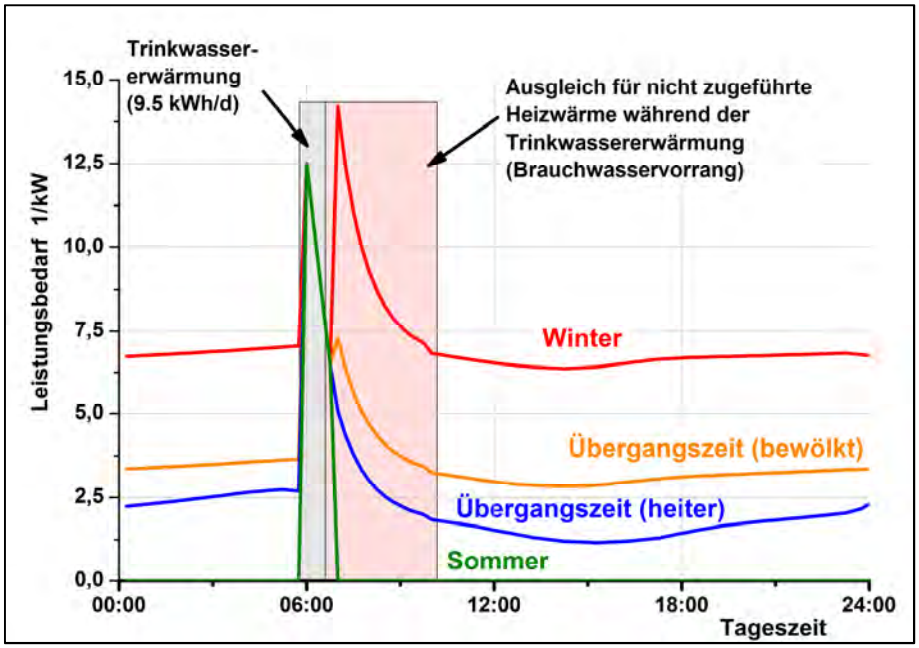


Abbildung 1-2: verwendete Tageslastprofile

Die Energieflüsse (Brennstoffzufuhr und elektrische Hilfsenergie sowie Nutzwärmemenge) und Emissionen (Gesamtstaub ähnlich zu VDI 2066-1 (2006)) auf Filterhülsen, Messdauer mindestens 6, besser 12 Stunden; CO elektrochemisch) wurden kontinuierlich während des gesamten Tageszyklus gemessen. Die Brennstoffenergie wurde aus Brennstoffmasse und Heizwert H_u berechnet.

Zur Erhöhung der Bilanzierungsgenauigkeit werden Tage mit geringerem Energieumsatz entsprechend öfter nacheinander wiederholt und dann das arithmetische Mittel berechnet. So besteht z.B. der Typtagsversuch „Übergang heiter“ aus drei aufeinander folgenden einzelnen Typtagen „Übergang heiter“.

Insgesamt beinhaltet ein Messzyklus die aus

Tabelle 2 ersichtliche Anzahl an Einzel-Tageslastprofilen, aus der sich der Versuchsablauf ergibt.

Tabelle 2: Zyklusdefinition, Wiederholungen der Typtage zur Reduzierung des Messfehlers

Typtag	Energieumsatz	Anz.	Summe	Abweichung
	kWh/d	n	kWh	
WB	171,33	1	171,33	Referenz
ÜB	87,63	2	175,26	-2,3%
ÜH	55,38	3	166,13	3,0%
SO	9,50	5	47,50	72%

Bei einem Messzyklus wird für jeden der vier Typtage ein Typtagnutzungsgrad ermittelt. Die Hochrechnung auf den Jahresnutzungsgrad erfolgte nach Gleichung (1), in der eine Gewichtung über den Wärmebedarf des jeweiligen Typtags und die Häufigkeit des Typtags im Referenzjahr berücksichtigt ist.

$$\eta_a = \frac{1}{\sum_{i=1}^{4} Q_{Bedarf,i} * n_i} * \sum_{i=1}^{4} \frac{Q_{Nutz,i}}{Q_{Brennstoff,i} + Q_{Hilfsenergie,i}} * Q_{Bedarf,i} * n_i \qquad (1)$$

mit

η_a:	*Jahresnutzungsgrad*
i:	*Typtag (Winter, Übergang bewölkt, Übergang heiter, Sommer)*
$Q_{Bedarf,i}$:	*Wärmebedarf am Typtag i*
$Q_{Nutz,i}$:	*Nutzwärmemenge am Typtag i*
$Q_{Brennstoff,i}$:	*umgesetzte Brennstoffenergie am Typtag i*
$Q_{Hilfsenergie,i}$:	*aufgewendete el. Hilfsenergie am Typtag i*
n_i:	*Häufigkeit des jeweiligen Typtags im Jahr*

Um zusätzlich zum Einfluss der hydraulischen Einbindung und Regelungstechnik auch die Bandbreite zum Einfluss der Feuerungsart (z.B. Unterschubfeuerung, Fallschachtfeuerung) und des Kesselgewichts (Aufheiz- und Abkühlverluste)

einschätzen zu können, wurden zwei verschiedene Kessel jeweils mit und ohne Pufferspeicher untersucht. Konkret wurden ein vergleichsweise kleiner und leichter Pelletkessel mit Abwurffeuerung und ein vergleichsweise schwerer Pelletkessel mit Unterschubfeuerung untersucht.

Tabelle 3 Auszug aus den Datenblättern der untersuchten Pelletkessel

	Kessel 1	**Kessel 2**
Nenwärmeleistung [kW]	14,9	15
min. Wärmeleistung [kW]	4,5	4,4
Kesselgewicht inkl. Anbauten[kg]	219	352
Wirkungsgrad Volllast [%]	95,2	94,3
Wirkungsgrad Teillast [%]	95	90
Wasserinhalt [l]	33	52
Abgastemperatur bei Nennleistung [°C]	90	120
Art der Pelletzuführung	Abwurffeuerung	Unterschubfeuerung
Leistungs- und Feuerungsregelung	intern	intern
Heizkreisregelung	extern	intern
Pufferlademanagement	extern	intern
Reinigung Wärmetauscher	automatisch	automatisch
Zündung	Zündgebläse	Glühzünder
Kesselklasse (nach EN 303-5)	3	3

Insgesamt dauert jede zu untersuchende Konfiguration aus Kessel und hydraulischer Einbindung (Messzyklus) 11 Tage reine Messzeit. Für belastbare Aussagen sind mindestens drei Wiederholungen erforderlich, so dass die reine Messzeit mindestens 66 Tage, also rund drei Monate beträgt.

1.1.2 Ergebnisse zum Jahresnutzungsgrad

Die Beurteilung aller Messunsicherheiten und sonstigen möglichen Fehler führt zu einer Aussagesicherheit von +/- 0,5 % bezogen auf den ermittelten Jahresnutzungsgrad. Dies bedeutet, dass ein angegebener Jahresnutzungsgrad von 81,5 % tatsächlich zwischen 81,0 % und 82,0 % liegt.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 1-4 angegeben und in Abbildung 1-3 zusätzlich grafisch veranschaulicht. Dabei ist zu erkennen, dass die ermittelten Jahresnutzungsgrade beider Kessel ähnlich sind. Sie liegen bei ca. 83 % ohne Pufferspeicher, bei der Hydraulikvariante mit Pufferspeicher etwa 2 % bis 3 % niedriger. Dies ist auf die thermischen Verluste des verwendeten Pufferspeichers mit 10 cm Weichschaumisolierung zurückzuführen.

Tabelle 1-4: Übersicht mit Ergebnisberechnung zum Jahresnutzungsgrad der untersuchten Pellet-KFA

11 x 24 h-Zyklus (ZAE Bayern)										
		Typtag	Anzahl	Q_{Bedarf}	Q_{Bedarf}	Wdhg.	MW eta HE	MW Q_{Nutz}	MW Q_{Brst}	MW Q_{hilf}
			d	kWh/d	∑ kWh	n	%	kWh/d	kWh/d	kWh/d
Kessel 1	ohne Puffer	KT	1	229,68	230	1	86,1%	233,63	268,57	2,65
		WB	108	171,33	18504	3	86,8%	170,26	193,94	2,32
		ÜB	75	87,63	6572	3	79,2%	78,19	96,03	2,75
		ÜH	87	55,38	4818	3	75,6%	48,17	61,32	2,36
		SH	95	9,50	903	3	64,5%	9,18	13,76	0,46
		Jahr	365	30796	30796		**82,7%**	29,3 MWh/a	34,8 MWh/a	0,7 MWh/a
	mit Puffer	KT	1	229,68	230	1	85,2%	228,54	265,57	2,59
		WB_P	108	171,33	18504	3	84,5%	168,07	196,61	2,36
		ÜB_P	75	87,63	6572	2	78,0%	84,77	107,00	1,69
		ÜH_P	87	55,38	4818	3	75,9%	54,36	70,46	1,14
		SH_P	95	9,50	903	3	60,7%	12,87	20,70	0,51
		Jahr	365		30796		**81,1%**	30,5 MWh/a	37,4 MWh/a	0,5 MWh/a
		zus. Solaranlage: ohne SH, nur 2/3 ÜH					**82,0%**			
Kessel 2	ohne Puffer	KT	1	229,68	230	1	88,6%	227,51	255,00	1,67
		WB	108	171,33	18504	3	88,3%	174,70	196,41	1,43
		ÜB	75	87,63	6572	3	79,9%	89,94	111,56	1,02
		ÜH	87	55,38	4818	3	72,4%	56,51	77,32	0,76
		SH	95	9,50	903	3	52,0%	9,66	18,06	0,51
		Jahr	365		30796		**83,0%**	31,4 MWh/a	38 MWh/a	0,3 MWh/a
	mit Puffer	KT	1	229,68	230	1	86,5%	224,86	257,39	2,44
		WB_P	108	171,33	18504	3	83,9%	166,15	196,25	1,70
		ÜB_P	75	87,63	6572	3	77,9%	84,46	107,16	1,21
		ÜH_P	87	55,38	4818	2	71,2%	54,07	75,28	0,63
		SH_P	95	9,50	903	2	50,7%	9,14	17,57	0,46
		Jahr	365		30796		**79,7%**	29,9 MWh/a	37,4 MWh/a	0,4 MWh/a
		zus. Solaranlage: ohne SH, nur 2/3 ÜH					**81,1%**			

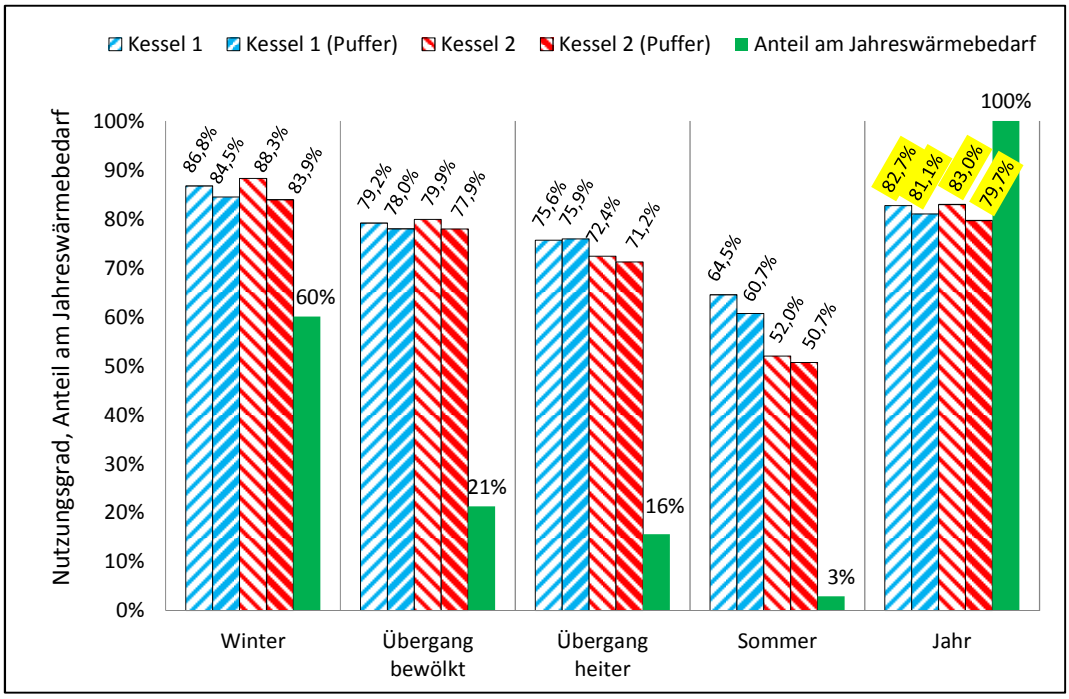


Abbildung 1-3: gemessene Typtag- und hochgerechnete Jahresnutzungsgrade der beiden untersuchten Kessel jeweils mit und ohne Pufferspeicher, Anteil der Typtage am Jahreswärmebedarf

In Abbildung 1-4 ist die Abhängigkeit des Jahresnutzungsgrades von der durchschnittlichen Kesselauslastung an den unterschiedlichen Typtagen sowie bei Nennleistung dargestellt. Holzpellet-KFA erreichen demnach Nutzungsgrade zwischen 85 % und 90 %. Bei sehr niedriger Auslastung sinkt der Nutzungsgrad aufgrund der Aufheiz- und Abkühlverluste deutlich. Dies wirkt sich beispielsweise im Sommer deutlich aus, da hier der Trinkwasserspeicher lediglich einmal täglich aufgeheizt wird. Hier weist ein leichterer Heizkessel mit vergleichsweise niedrigerer Wärmekapazität Vorteile gegenüber einem schwereren Kessel mit höherer Wärmekapazität auf.

Häufig werden Holzpellet-KFA mit thermischen Solaranlagen und Pufferspeicher kombiniert. Typische thermische Solaranlagen können dabei den Wärmebedarf im Sommer und zum Teil auch in der Übergangszeit decken. Dadurch wird der ineffiziente Sommerbetrieb von Holzpellet-KFA weitgehend vermieden.

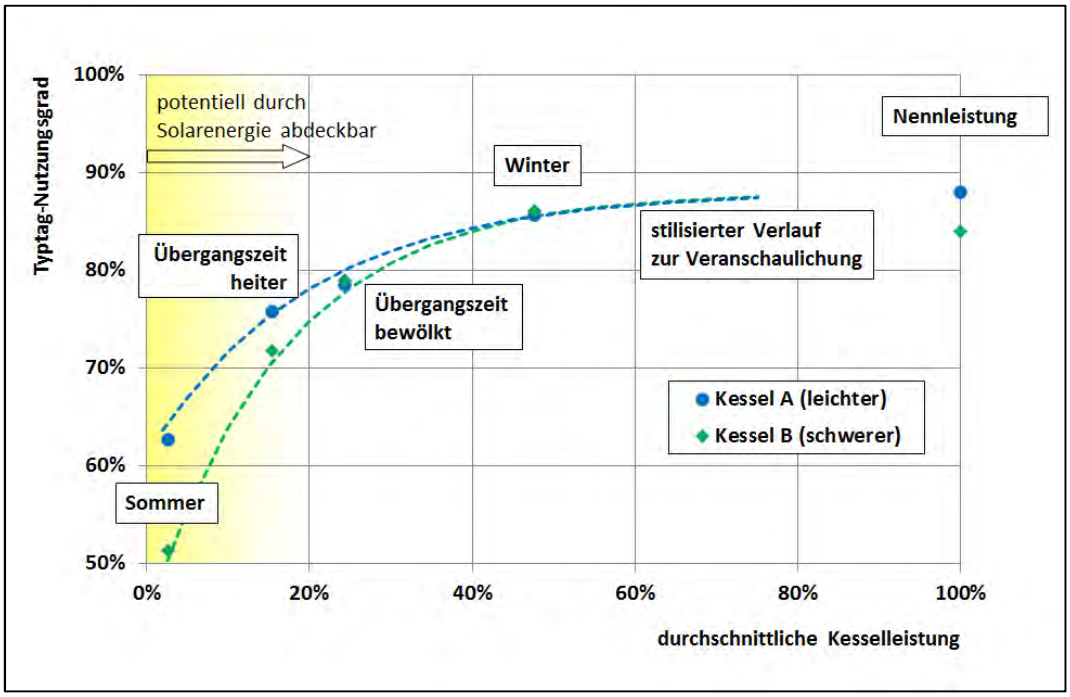


Abbildung 1-4: Abhängigkeit des Jahresnutzungsgrades von der relativen Kesselauslastung für leichte und schwere Kessel

Einfluss der Über- bzw. Unterdimensionierung bezogen auf Normauslegung nach DIN 12831

Der signifikante Einfluss der Kesseldimensionierung, also der Anpassung der Kesselleistung an den tatsächlich zu deckenden Wärmebedarf, auf den Jahresnutzungsgrad ist in Abbildung 1-5 dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass für das zugrunde liegende Gebäude etwa 60 % des Wärmebedarfs im Winter und weitere 21 % des Wärmebedarfs in der bewölkten Übergangszeit anfallen. Daher wirken sich die niedrigeren Nutzungsgrade an den Typtagen „Übergang heiter“ und „Sommer“, an denen insgesamt nur etwa ein Viertel des Jahresgesamtwärmebedarfs benötigt wird, energetisch relativ gering aus. Es zeigt sich, dass bei normgerechter Kesselauslegung Jahresnutzungsgrade um etwa 80 % - 85 % erreicht werden können. Ist der Heizkessel jedoch um 50 % zu groß ausgelegt, dann verringert sich der Jahresnutzungsgrad um 5 %, bei 100 % Überdimensionierung sogar um 10 %. Diese Ergebnisse zeigen, dass eine deutliche Überdimensionierung von Holzpellet-KFA zu einer Reduzierung des Jahresnutzungsgrades führt. Insofern muss von der gängigen Praxis, „aus Sicherheitsgründen lieber einen größeren Kessel einzubauen“, dringend abgeraten werden. Es kommt hinzu, dass überdimensionierte Pellet-KFA in der Regel sehr häufig in emissionsintensiven Schwachlastbetriebszuständen laufen und die erhöhten Emissionen, die meist mit erheblichen Rußablagerungen verbunden sind, einen erhöhten Wartungsaufwand bedeuten

.

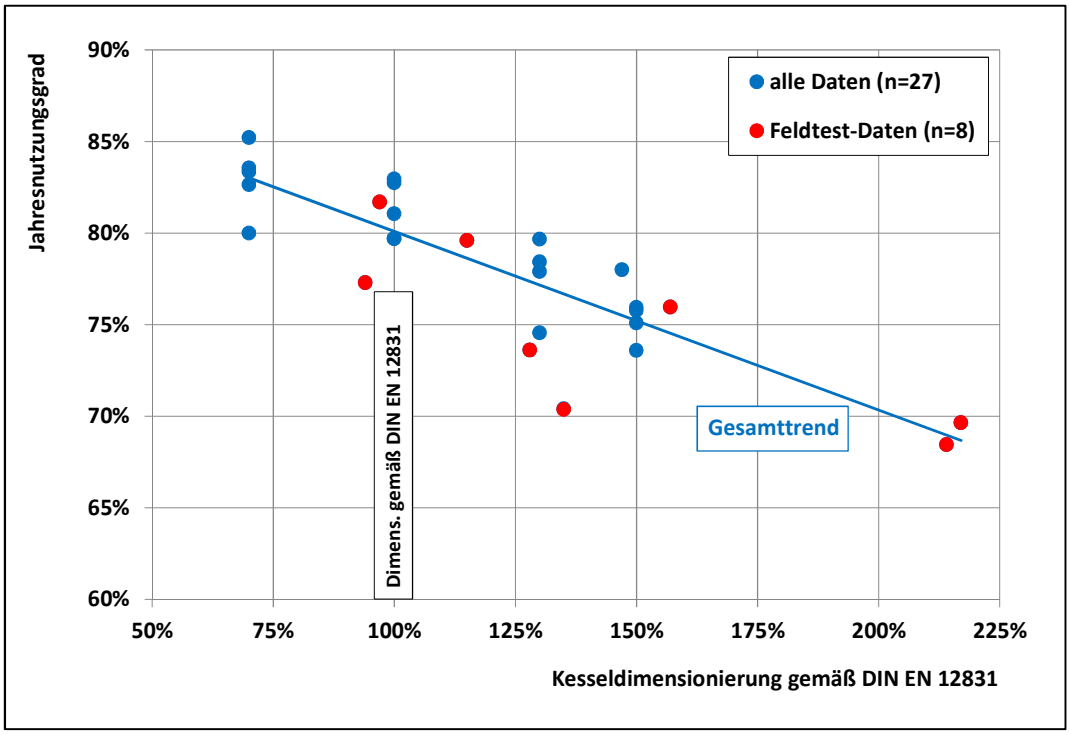


Abbildung 1-5: Abhängigkeit des Jahresnutzungsgrades von der Kesseldimensionierung, Einfluss eines Pufferspeichers

Die erzielten Messergebnisse sind plausibel. Beim Vergleich mit Feldmessdaten zu Beurteilung der Praxisrelevanz bleiben Verluste an realen Heizungsanlagen aufgrund hydraulisch nicht abgeglichener Systeme unberücksichtigt, da die Hydraulik des Versuchsstands aufgrund nur eines Verbrauchers (Kühlwasser-Wärmeübertrager) als ideal angesehen werden kann. Die Verluste aufgrund hydraulisch nicht abgeglichener Heizungsanlagen bzw. das Optimierungspotential durch den hydraulischen Abgleich wurde beispielsweise im Projekt OPTIMUS (JAGNOW et al., 2012) umfangreich ermittelt. Das Optimierungspotential kann bis zu 21 % betragen. Überträgt man die Ergebnisse aus OPTIMUS auf das in diesem Vorhaben zu Grunde gelegte typische Einfamilienhaus mit einem Wärmebedarf von ca. 240 kWh/m²a, so läge das Optimierungspotential durch hydraulischen Abgleich im Bereich um 5 %. Dies bedeutet, dass die in diesem Vorhaben ermittelten Jahresnutzungsgrade im Bestand überwiegend tatsächlich ca. 5 % niedriger sind, also im Bereich der Feldmessergebnisse (Mittelwert ca. 73 %, (KUNDE et al., 2009)) liegen. Die Differenz der bei den Feldmessungen ermittelten Jahresnutzungsgrade zu den hier ermittelten Werten abzüglich 5 % für einen fehlenden hydraulischen Abgleich ist weitgehend auf Überdimensionierung der Anlagen in der Praxis zurückzuführen.

1.1.3 Ergebnisse zum Emissionsverhalten

Jahres-Gesamtemissionen

Bei allen Versuchen wurden die gasförmigen Emissionen, insbesondere Kohlenmonoxid, sowie die Staubemissionen gemessen. Für die Staubmessungen wurde die Messmethode nach der Richtlinie VDI 2066–1 (2006) so modifiziert (s. a. THRÄN et al., 2011), dass eine 24 stündige Staubbilanzierung durchgeführt werden konnte. Durch die Bestimmung der mittleren Staubemission jedes Typtags kann auf die Jahresgesamtemission hochgerechnet werden.

Die erzielten Ergebnisse sind in Tabelle 1-5 angegeben und in Abbildung 1-6 und Abbildung 1-9 grafisch veranschaulicht.

Tabelle 1-5: Übersicht der Emissionsmessergebnisse an verschiedenen Typtagen und Hochrechnung auf Jahreswerte (grün), rechnerische Berücksichtigung einer thermischen Solaranlage (gelb)

Ergebniszusammenfassung Emissionen

		Typtag	Anzahl	Abgas-volumen	MW Staubkonz.	Staub-emission	MW CO-Konz.	CO-Emission	MW O2-Konz.
			d	m³/d	mg/m³ i.N.@13%O2	g/d i.N.	mg/m³ i.N.@13%O2	g/d i.N.	%
Kessel 1	ohne Puffer	WB	108	802,15	91,9	46,7	1407,3	122,1	15,9
		ÜB	75	705,26	351,9	87,0	735,1	110,1	18,6
		ÜH	87	370,07	220,3	31,4	532,3	149,2	18,8
		SH	95	82,08	126,9	5,6	443,6	134,9	16,8
		Jahr	365	179521	**14,8 kg/a**		**47,2 kg/a**		
	mit Puffer	WB_P	108	730,21	83,9	37,2	685,5	152,6	16,0
		ÜB_P	75	361,23	146,7	30,6	491,7	190,4	16,4
		ÜH_P	87	252,35	103,8	11,3	259,7	110,3	17,6
		SH_P	95	64,97	141,2	5,6	343,1	88,1	16,1
		Jahr	365	134082	**7,8 kg/a**		**48,7 kg/a**		
		us. Solaranlage: ohne SH, nur 2/3 Ü			**7 kg/a**		**37,2 kg/a**		
Kessel 2	ohne Puffer	WB	108	437,63	27,7	12,4	174,0	77,7	12,8
		ÜB	75	247,25	59,1	12,4	743,4	157,0	14,1
		ÜH	87	181,22	75,4	11,3	841,1	128,2	14,5
		SH	95	37,07	34,7	1,3	348,5	13,5	12,6
		Jahr	365	85095	**3,4 kg/a**		**32,6 kg/a**		
	mit Puffer	WB_P	108	287,63	28,5	8,8	103,0	34,6	12,1
		ÜB_P	75	199,43	26,7	5,6	436,5	92,5	12,7
		ÜH_P	87	129,77	23,7	3,5	460,7	70,2	11,9
		SH_P	95	26,43	26,5	1,0	407,1	15,2	9,7
		Jahr	365	59822	**1,8 kg/a**		**18,2 kg/a**		
		us. Solaranlage: ohne SH, nur 2/3 Ü			**1,6 kg/a**		**14,7 kg/a**		

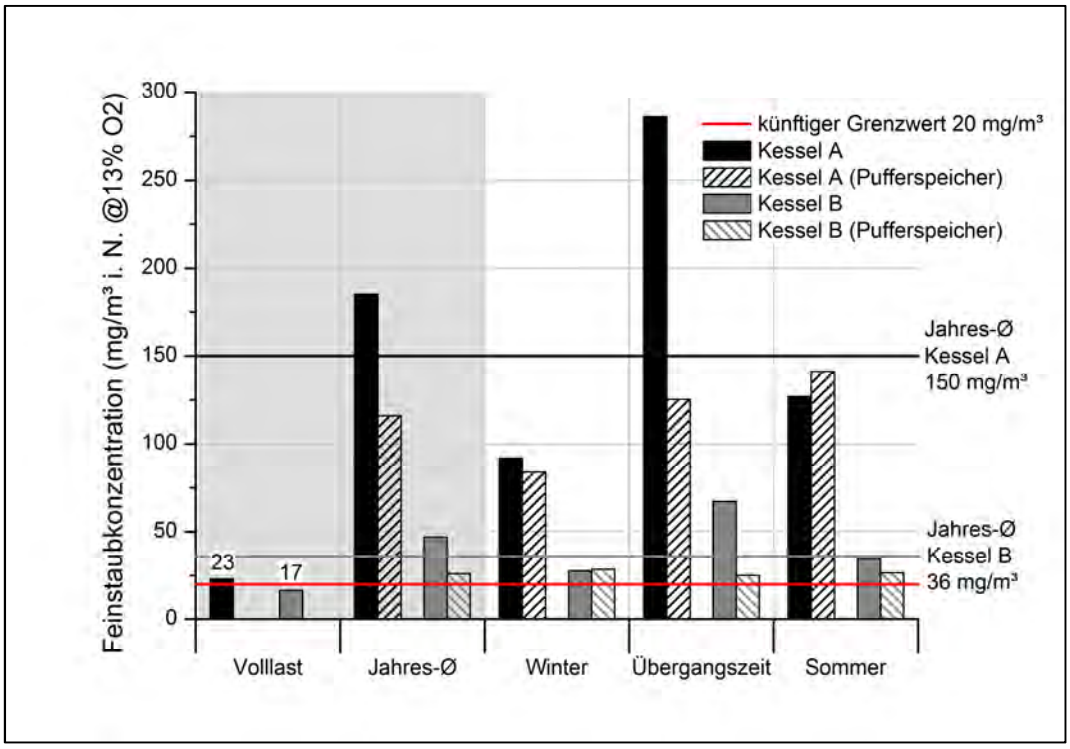


Abbildung 1-6 mittlere Staubkonzentrationen aus den 24-h-Staubmessungen bei Volllast, als hochgerechneter Jahresdurchschnitt sowie an den unterschiedlichen Typtagen, Vergleich mit Grenzwerten nach der (1. BImSchV), (Kessel A = Kessel 1, Kessel B = Kessel 2)

Die Ergebnisse der gravimetrischen Staubmessungen zeigen, dass die aus einer Holzpellet-KFA emittierte Jahres-Gesamtstaubfracht bei nahezu stationärem Volllastbetrieb, wie dies bei Pufferbetrieb üblich ist, etwa halbiert werden kann. Bei bestimmungsgemäßem Betrieb ist es möglich, an modernen Holzpellet-KFA heute Staubemissionskonzentrationen im Bereich der zukünftigen Grenzwerte nach der 1. BImSchV (2010) zu erreichen. Wie die Untersuchungen aber auch zeigen, finden insbesondere bei Anlagen ohne Pufferspeicher Volllastbetriebszustände praktisch kaum statt (siehe Abbildung 1-7), in denen Holzpellet-KFA typischerweise niedrigere Emissionen als bei Schwachlastbetrieb aufweisen. Daher können die tatsächlichen Jahres-Gesamtstaubfrachten auch nicht aus den Ergebnissen von Prüfstandmessungen bei Volllastbetrieb abgeleitet werden. Je nach Kesselbetriebsweise, die maßgeblich durch die Regelungsstrategie bestimmt wird, liegen die tatsächlichen jahresdurchschnittlichen Gesamtstaub-Emissionskonzentrationen um das 1,5- bis 7,5-fache über dem derzeit angestrebten zukünftigen Grenzwert.

Kohlenstoffmonoxid-Emissionen

Die nachfolgenden Abbildungen veranschaulichen den deutlichen Unterschied im Emissionsverhalten zwischen Heizkesseln mit und ohne Pufferspeicher. Besonderes Augenmerk soll hier auf die Kohlenmonoxid-Emissionen (rot) gelegt werden, die einen Eindruck davon vermitteln sollen, wie vollständig bzw. unvollständig der

Verbrennungsprozess abläuft. Es ist nachvollziehbar, dass im modulierenden Betrieb bei der Anlage ohne Pufferspeicher (Abbildung 1-7) deutlich mehr Ruß entsteht, als bei der Anlage mit Pufferspeicher, die an einem bewölkten Übergangstag lediglich viermal etwa zwei Stunden in Betrieb ist (Abbildung 1-8).

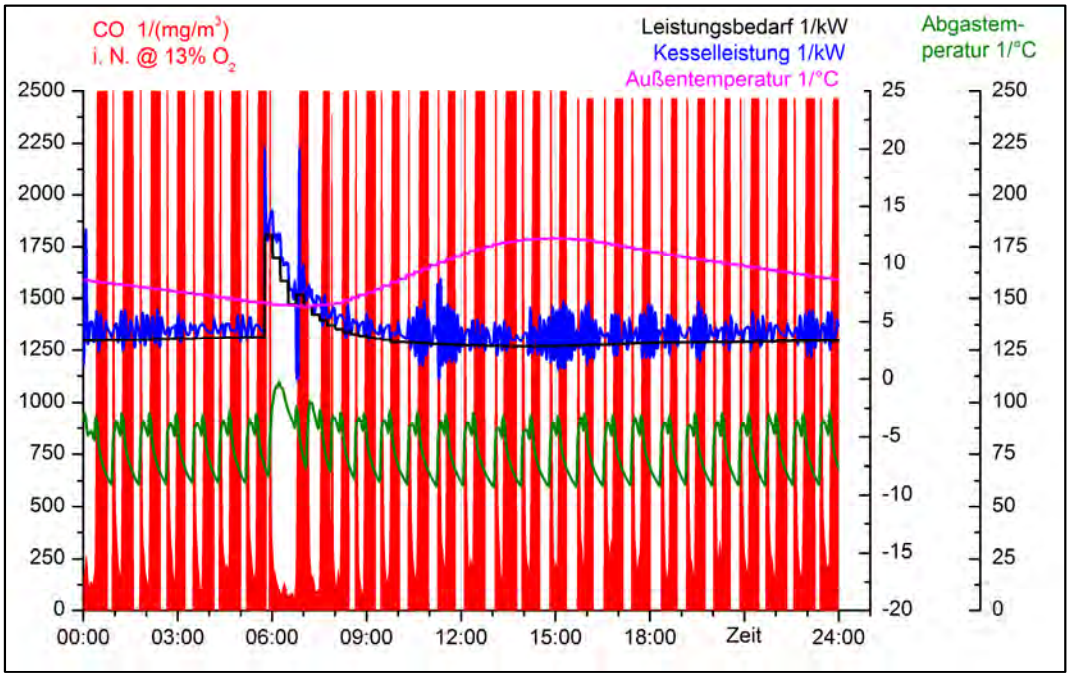


Abbildung 1-7: Emissions- und Lastverlauf eines Pelletheizkessels ohne Pufferspeicher am Typtag „Übergang bewölkt“

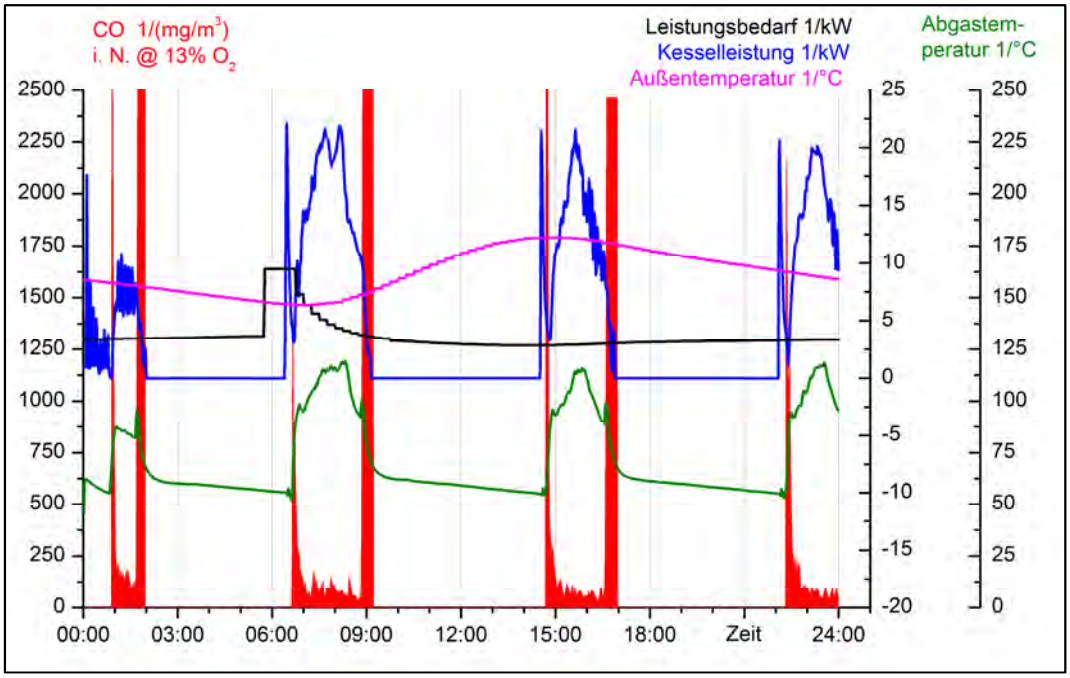


Abbildung 1-8: Emissions- und Lastverlauf eines Pelletheizkessels mit Pufferspeicher am Typtag „Übergang bewölkt“

Die Ergebnisse der CO-Emissionsmessungen sind zusammenfassend in Abbildung 1-9 grafisch veranschaulicht. Sie zeigen, dass das aus einer Holzpellet-KFA emittierte Kohlenstoffmonoxid bei nahezu stationärem Volllastbetrieb, wie dies bei Pufferbetrieb üblich ist, vergleichsweise niedrige Werte erreichen kann. Bei bestimmungsgemäßem Betrieb ist es möglich, an modernen Holzpellet-KFA auch die CO-Emissionen signifikant unter dem zukünftigen Grenzwert nach der 1. BImSchV (2010) zu erreichen. Da ohne Pufferspeicher Volllastbetriebszustände kaum stattfinden (siehe Abbildung 1-7), in denen Holzpellet-KFA niedrigere CO-Emissionen als bei Schwachlastbetrieb aufweisen, ist die alleinige Betrachtung des Volllastzustandes für die Jahresemissionen nicht aussagekräftig. Je nach Kesselbetriebsweise, die maßgeblich durch die Regelungsstrategie bestimmt wird, liegen die tatsächlichen jahresdurchschnittlichen CO-Emissionskonzentrationen um das bis zu 1,5-fache über dem derzeit angestrebten zukünftigen Grenzwert, der jedoch bei Betrieb mit Nennleistung (Volllast) einzuhalten ist.

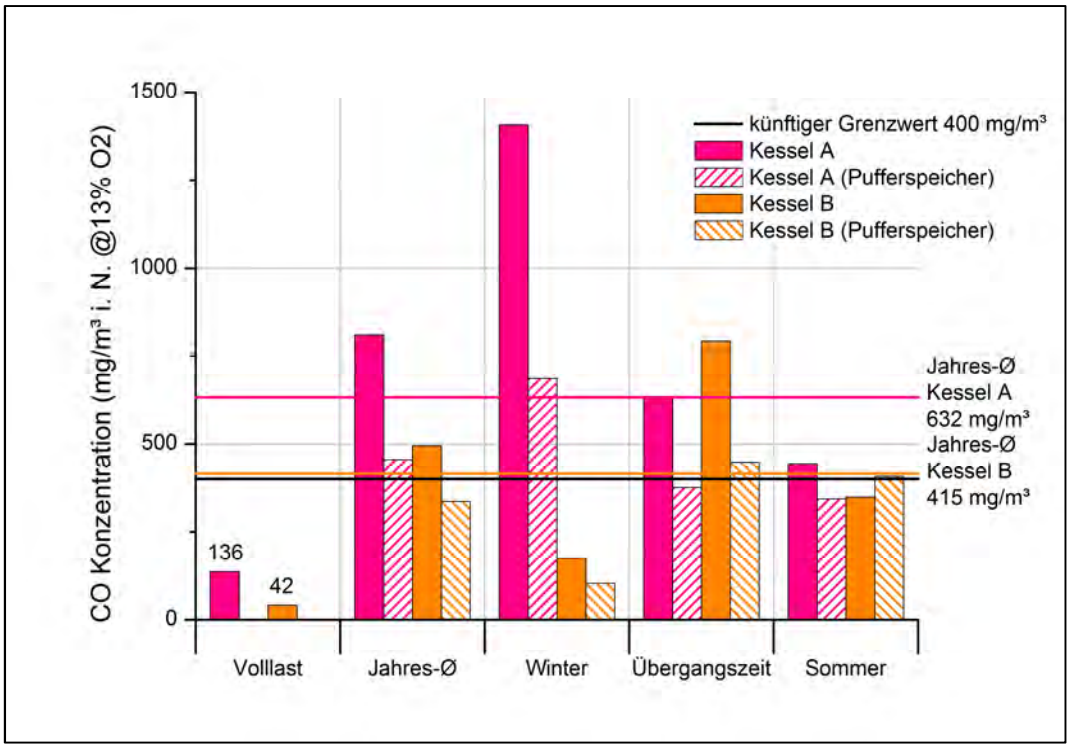


Abbildung 1-9: Übersicht der gemittelten CO-Konzentrationen bei Volllast, als Jahresdurchschnitt und an den unterschiedlichen Typtagen (Kessel A = Kessel 1, Kessel B = Kessel 2)

1.2 Sorptive Wärmeauskopplung

Entwicklungsziel im zweiten Arbeitspaket ist der Nachweis der technischen Machbarkeit für eine neuartige sorptive Wärmeauskopplung auf Basis des hygroskopischen Wärmeträgermediums LiCl, die dazu im Labormaßstab untersucht wurde.

Als wichtigster Parameter wurde untersucht, ob bei den für den Entfeuchtungsprozess notwendigen Temperaturen (ca. 400 °C) Dioxine durch den Kontakt des heißen Abgases aus der Biomasseverbrennung mit dem chlorhaltigen Sorptionsmittel gebildet werden.

1.2.1 Theoretische Vorüberlegungen

Aus der Antragsphase der Studie steht eine Systemsimulation der sorptiven Abgasentfeuchtung mit Lithiumchlorid-Lösung als Sorbens zur Verfügung. Diese Rechnung ist auf eine Erdgasfeuerung mit einem normierten Abgasmassenstrom von 1 m^3/s ausgelegt. Daraus wurde eine angepasste Rechnung für Holzfeuerungen abgeleitet.

Als Werkzeug wird der Gleichungslöser (EES) verwendet mit dem Bilanzgleichungen für Stoff- und Enthalpieströme gelöst werden. Die Funktionen- und Stoffdatenbibliothek bietet umfangreiche Werkzeuge zur Berechnung von klimatechnischen Verfahren im Stoffsystem Wasser/Luft.

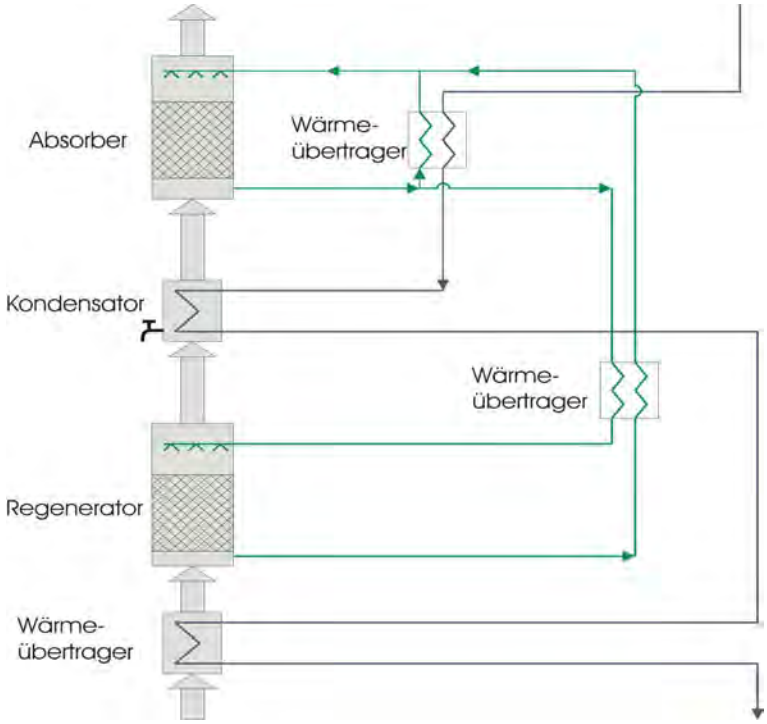


Abbildung 1-10: Funktionsskizze einer sorptiven Wärmeauskopplung

Eingangsdaten

Die Rechnung wurde an möglichst greifbare Eckdaten einer KFA mit 30 kW Leistung angepasst, um eine hohe Nachvollziehbarkeit zu erreichen. Mit dem Leistungsbereich bis ca. 50 kW liegen am ZAE Bayern viele Erfahrungen aus Feld- und Prüfstands-Messungen vor, die hier angewandt werden konnten.

Verbrennungsrechnung

Zur Gewinnung der bisher direkt angegebenen Eingangsdaten wurde eine Verbrennungsrechnung für Holzbrennstoffe implementiert.

Brennstoffzusammensetzung, Brennwert und Wassergehalt wurden aus FNR (2001) entnommen. Aus Brennstoffwassergehalt, Luftfeuchte und den Verbrennungsprodukten wird die Feuchtebeladung des Abgases ermittelt.

Die auf 1 m^3/s normierte Rechnung aus der Antragsphase (entspricht ca. 1 MW_{th}) wurde auf eine Energiezufuhr von 30 kW Brennwert skaliert. Brennstoff- und Luftmassenstrom werden dementsprechend über den spezifischen Brennwert und die Luftzahl ermittelt.

Fehlerabschätzung Luft statt Abgas

Um die Bibliotheken von EES (2011) nutzen zu können, wird mit dem Trägergas Luft anstatt dem realen Abgas gerechnet. Abweichungen der Wärmekapazität und der Taupunktkurve müssen berücksichtigt werden.

Ein Fehler bei der Berechnung des primären Wärmeübertragers wird durch das Ansetzen von Enthalpieströmen anstatt treibender Temperaturdifferenzen umgangen.

Ab dem Regenerator (400 °C bis 20 °C) werden die Temperaturen berücksichtigt. Die Wärmekapazität von Luft weicht von der des Abgases um -0,5 % bis +1,5 % ab. Die Taupunkte bei gleicher Massenbeladung liegen in Luft um ca. 0,5 K niedriger als im Abgas.

Referenzsystem konventionelle „Heizwerttechnik“

Als konventionelles Referenzsystem diente ein Wärmeübertrager, der das Abgas ohne Kondensation auf 140 °C bei einem mittleren Kesselwirkungsgrad von 0,85 auskühlt. Der Wirkungsgrad von 0,85 wurde zuvor bei Feld- und Prüfstands-Messungen am ZAE Bayern bestimmt und repräsentiert einen durchschnittlichen Kesselwärmeübertrager auf dem Stand der Technik.

Konkurrenzsysteme

Brennwertnutzung durch Kondensation aufgrund niedriger Rücklauftemperaturen (z. B. 30 °C) kann nicht als Referenz dienen, da die sorptive Brennwertnutzung gerade auf Heizkreise mit hohen Rücklauftemperaturen (z. B. 50 °C) zielt. Die Effizienz-steigerung durch Vorwärmung der Verbrennungsluft im Gegenstrom mit dem Abgas

wurde als Alternative berechnet. Hierbei lässt sich jedoch keine nennenswerte Effizienzsteigerung durch Kondensation erzielen.

Parameterstudien

Um den Einfluss der Eingangsparameter zu beurteilen, wurde einen Parameterstudie durchgeführt. Dafür wurden Parameter gewählt, die z. T. direkt in Konstruktionsmerkmale oder Betriebsdaten umgesetzt werden können.

In 2 Parameterstudien wurden jeweils die Rücklauftemperatur des Heizkreises von 40 °C bis 60 °C sowie zum einen die Feuchte und zum anderen der Brennwert des Brennstoffs variiert. Fest gesetzte Parameter sind Brennstoffzufuhr und Luftzahl, Massenströme im Heiz- und Solekreis, die Austauschflächen von Generator und Adsorber und die Abgastemperatur am Regeneratoreintritt. Aus der berechneten Leistung und einem Vergleichswert für ein konventionelles Heizsystem wurde ein Leistungsquotient gebildet.

Brennwert (Brennstoffgüte)

Mit sinkendem spezifischem Brennwert H_s steigt der mögliche Leistungszugewinn durch Sorptions-Brennwerttechnik. Der Grund ist ein höherer Massendurchsatz des Systems und vor allem der höhere Massenstrom des Wasserballasts bei einem gegebenen Wassergehalt des Brennstoffs. Insbesondere ungetrocknete Halmgüter weisen sowohl niedrige Brennwerte als auch hohe Wassergehalte auf. Möchte man Halmgüter als Brennstoff einsetzen, ist diese sorptive Brennwertnutzung besonders interessant.

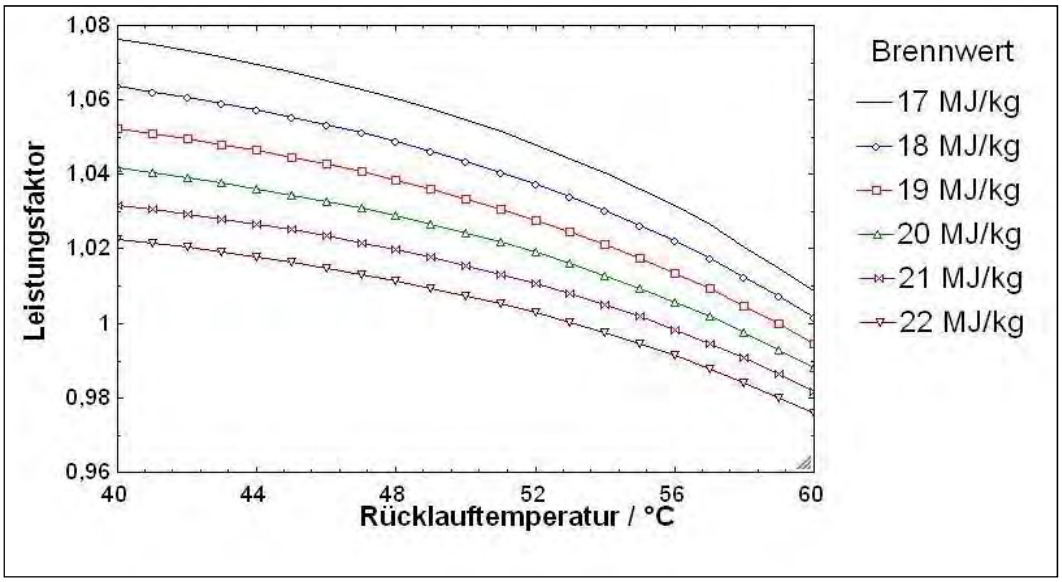


Abbildung 1-11: Einfluss des Brennstoff-Brennwertes und der Rücklauftemperatur auf den Leistungsgewinn durch Kondensation

Brennstoffwassergehalt

Bei gegebenem Brennwert steigt die mögliche Leistungssteigerung natürlich mit dem Wassergehalt des Brennstoffs an. Je feuchter der Brennstoff, desto mehr kann sorptiv auskondensiert werden. Beim Einsatz von Hackgut kann die sorptive Entfeuchtung als Ersatztechnologie für Hackguttrocknung wirtschaftlich und energetisch sehr interessant sein.

Nur bei Brennstoffen mit geringer Restfeuchte und hohem Brennwert der Trockenmasse ist die konventionelle Technik („Heizwert-Technik“) unter Umständen effizienter bzw. sind die Leistungssteigerungen bei sorptiver Entfeuchtung zu gering, um den Mehraufwand zu rechtfertigen.

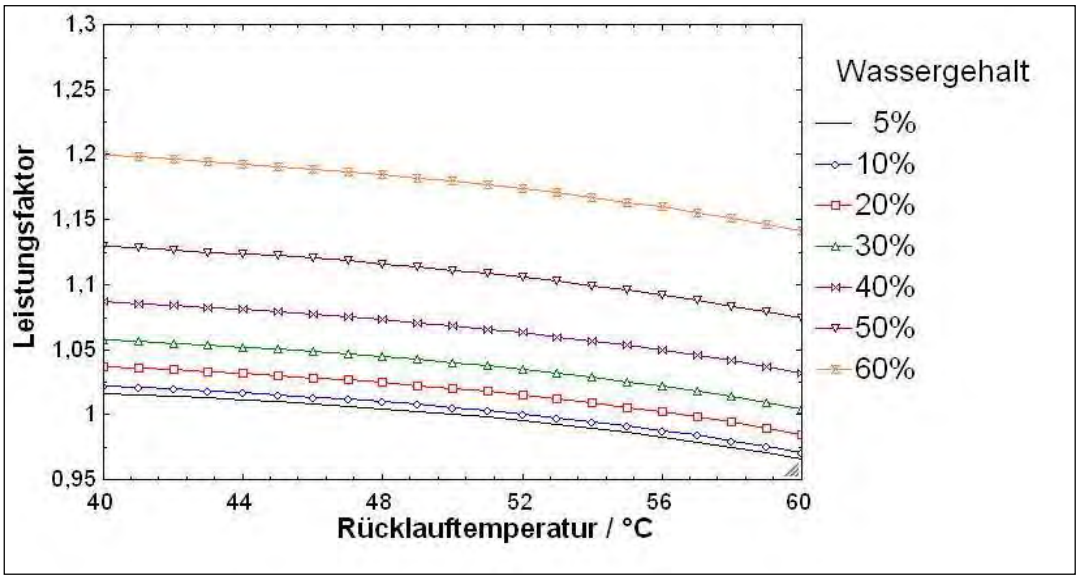


Abbildung 1-12: Einfluss des Brennstoff-Wassergehaltes und der Rücklauftemperatur auf den Leistungsgewinn

Berechnungen zum Lithiumcarbonat-Ausfall

Das Lösen von CO_2 in der LiCl-Sole kann unter bestimmten Bedingungen zum Ausfallen von Lithiumcarbonat führen. Überschlagsrechnungen haben gezeigt, dass die Löslichkeitsgrenze unter den in der Anlage gegebenen Bedingungen immer um ca. 5 Größenordnungen über der gelösten Konzentration liegt.

Bedingungen der Dioxin-/Furanbildung

Biomasse-Brennstoffe beinhalten in der Regel Chlorverbindungen. Bei jeder herkömmlichen Biomasseverbrennung können also Dioxine entstehen.

Aufgrund der Anwesenheit von zusätzlichem Chlor (LiCl-Sole) und eventuellen unverbrannten Kohlenwasserstoffen aus der Biomasseverbrennung in Regenerator und Absorber ist eine Untersuchung der Bedingungen, in denen zusätzliche Dioxine /

Furane entstehen oder abgebaut werden notwendig.Die De-Novo-Synthese von Dioxinen in einem Abgas wird begünstigt durch Temperaturen von 300 °C bis 600 °C und niedrigem Sauerstoffgehalt (LAUNHARDT et al., 1998). Chlorverbindungen von Kupfer und Eisen wirken als Katalysatoren für die Dioxin-Bildung. Letzteres ist insbesondere bei der Konstruktion von Feuerungen aus Stahlwerkstoffen zu beachten.

Geeignete Temperaturführung, Einstellung der Luftzahl und die Materialien des Regenerators spielen also Schlüsselrollen bei der Verhinderung der Dioxinbildung. Die Erkenntnisse aus den Labormessungen sollen in die Gestaltung des sorptiven Entfeuchtungsprozesses mit einfließen.

1.2.2 Aufbau der Laboranlage

Die Laboranlage wurde von vornherein auf die Untersuchungen zur nassen Kontaktierung ausgelegt, da auch die Experimente der trockenen Kontaktierung mit diesem Aufbau umsetzbar sind. Während einiger Vorversuche wurde die Anlage mehrfach modifiziert, wichtige Umbauten sind nachfolgend erläutert sowie fotografisch dokumentiert. Sämtliche Bauteile sind aus Gründen der Korrosionsfestigkeit, der Solebeständigkeit sowie der mechanischen Stabilität aus Glas bzw. Titan gefertigt.

Partikelfilter: Bestandteil der ursprünglichen Konstruktion war ein Partikelfilter, der sich jedoch als nicht notwendig erwies, hohe Druckverluste erzeugte und deshalb rückgebaut wurde.

Kontaktapparat: Der ursprüngliche Kontaktapparat erwies sich als zu voluminös, die notwendige Prozesstemperatur konnte aufgrund zu starker Auskühlung nicht erreicht werden. Vom Glasbläser wurde ein konventioneller Rundkolben (2000 ml) auf drei unterschiedliche Normschliff-Anschlüsse umgebaut (Abb. 1-13).

Kondensationsstrecke: Ein zusätzlicher Kühler wurde vor der XAD-Kartusche in Serie geschaltet, um eine ausreichende Entfeuchtung durch Kondensation zu erreichen.

Abbildung 1-13: Kontaktapparat

Kontaktlanze: Die Kontaktlanze ist das Kernstück des Kontaktapparates. Hier wird das heiße Abgas (ca. 400 °C) mit LiCl-Feststoff bzw. später mit LiCl-Sole (ca. 120 °C) in Kontakt gebracht. Aus prozesstechnischen Gründen dürfen im Kontaktbereich und bis zur Dioxinanalyseprobe keine eisenhaltigen Metalle verwendet werden, da Eisen bei der Dioxinbildung als Katalysator wirkt und so zusätzlich Dioxin gebildet werden kann. Die Kontaktlanze besteht aus einem Reinst-Titan-Rohr, das elektrisch beheizt und gedämmt (Hochtemperaturdämmung) ist. Das Ti-Rohr ist in ein Schutzrohr aus Glas eingebaut und abgedichtet. Insbesondere die Abdichtung stellte sich als technisch äußerst schwierig dar. Zunächst wurde ein zementartiger Hochtemperaturklebstoff verwendet, der aber nicht elastisch genug bezüglich der Wärmedehnung war und keine ausreichende Abdichtung gegenüber Flüssigkeiten bot (Abb. 1-14).

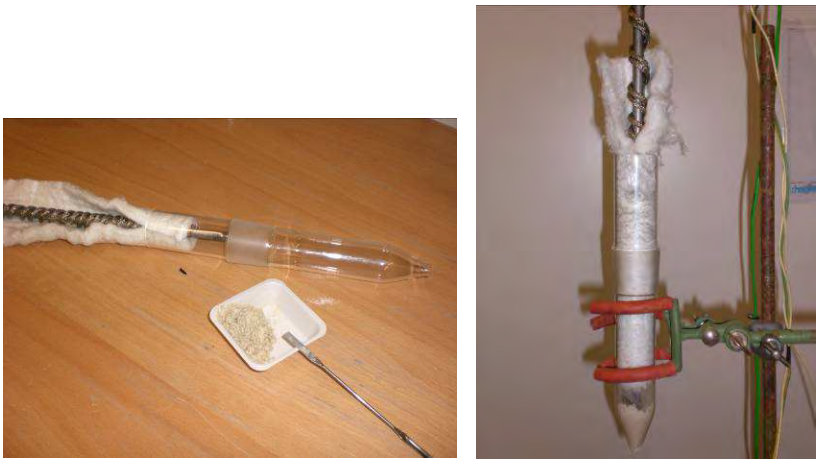


Abbildung 1-14: Kontaktlanze, Abdichtung mit Hochtemperaturklebstoff (zementartig)

Nach umfangreichen Recherchen wurde ein Hochtemperatursilikon ausgewählt, das nach Herstellerangaben bis 400 °C einsetzbar ist. In Vorversuchen wurde untersucht, ob auch kurzzeitig höhere Einsatztemperaturen bis 470 °C möglich sind. Die Kontaktlanze wurde entsprechend umgebaut (Abb. 1-15 bis 1-18).

Abbildung 1-15: Kontaktlanze mit Hochtemperatursilikonabdichtung vor (links) und nach (rechts) der ersten Kontaktierung mit LiCl-Feststoff

Abbildung 1-16: Kontaktlanze im eingebauten Zustand während einer Kontaktierung mit LiCl-Feststoff

Abbildung 1-17 und 1-18: an die Kontaktlanze „angebackenes“ LiCl (fest) nach einer Kontaktierung mit Abgas aus dem Pelletkessel

1.2.3 Versuchsdurchführung

In Abbildung 1-19 bis Abbildung 1-21 ist die Laboranlage während eines Versuchs zur trockenen Kontaktierung dargestellt.

Die gesammelten Proben aus der trockenen und der nassen Kontaktierung wurden gemeinsam zur Dioxinanalyse an die Firma Wessling Laboratorien GmbH gesendet.

Abbildung 1-19: Rückansicht der LiCl-Laboranlage mit Probenahmeapparatur (Trockenturm, Balgengaszähler, Vakuumpumpe), Abgasanalysegerät (unten)

Abbildung 1-20: LiCl-Laboranlage während eines Versuchs zur trockenen Kontaktierung

Abbildung 1-21: Pelletkessel (Vordergrund) mit beheizter Probenahmeleitung zur LiCl-Laboranlage

1.2.4 Ergebnisse der sorptiven Abgasentfeuchtung

Die Ergebnisse, die von Wessling Laboratorien GmbH ermittelt wurden, wurden zusammen mit Dioxin-Spezialisten des bifa Umweltinstituts, Augsburg, interpretiert.

Dioxine/Furane bei der Holzverbrennung in Kleinfeuerungsanlagen

Vorab sei angemerkt, dass für Kleinfeuerungsanlagen für feste Brennstoffe weder bei der Typprüfung EN 303-5 (1999) noch in der 1. BImSchV (2010) Dioxinmessungen gefordert werden und dass auch keine Grenzwerte für PCDD/PCDF festgelegt sind. Dennoch wurden in der Vergangenheit von verschiedenen Instituten und Forschern mehrfach Dioxin- und Furanmessungen durchgeführt. In der Literatur wird eine große Bandbreite an Dioxin-/Furankonzentrationen bei Emissionen aus Holz beheizten Kleinfeuerungsanlagen angegeben, z. B. bei NUSSBAUMER (2004), THANNER et al. (2002) und HEDMAN et al. (2006).

Die grundlegenden Bildungsmechanismen für Dioxine und Furane (PCDD/F) bei Verbrennungsprozessen müssen berücksichtigt werden. Dazu schreibt Nussbaumer unter anderem:

„PCDD/F werden durch den sukzessiven Aufbau aus den Elementen Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff und Chlor gebildet. Diese De-novo-Synthese findet in einem Temperaturbereich ab rund 150°C und bis über 550°C statt mit einem oft beobachteten Bildungsmaximum um 300°C sowie einem zweiten Bildungsmaximum vor allem von PCDF bei knapp 500°C statt. In Verbrennungsanlagen liegt dieser Temperaturbereich vor allem im Abhitzebereich vor (Kessel und Abgasreinigung). Er kann jedoch auch in Randzonen des Feuerraums sowie am Anfang und Ende des Rostes (abkühlende Asche) auftreten.

Bei thermischen Prozessen gilt die De-novo-Synthese als Hauptquelle der PCDD/F-Emissionen. Sie läuft fast ausschließlich als heterogene Gas-Feststoffreaktion am Staub ab, wobei Flugasche oder fester Kohlenstoff (Ruß) als Oberfläche dient. Die Reaktion wird durch katalytisch wirkende Metalle wie Kupfer und Eisen unterstützt. Voraussetzung zur Dioxinbildung ist somit die gleichzeitige Anwesenheit von Chlor, Kohlenstoff, Sauerstoff sowie Kupfer oder Eisen (insbesondere in Form von Metall-Chloriden) als Katalysator, weshalb der Chloridgehalt der Asche oft ein guter Indikator für die PCDD/F-Emissionen ist und die Stäube sowohl als Reagens als auch als Katalysator wirksam sein können.“

Ergänzend ist festzuhalten, dass jede der Komponenten Kohlenstoff, Sauerstoff und Chlor limitierend für die PCDD/F-Bildung sein kann – bei hohem Sauerstoffüberschuss und Kohlenstoffmangel wegen sehr guten Ausbrands sind geringe PCDD/F-Konzentrationen zu erwarten, ebenso wie bei extrem schlechtem Ausbrand (Anwesenheit von ausreichend Kohlenstoff) wegen Sauerstoffmangels. Chlor ist als natürlicher Bestandteil des Brennstoffs immer in geringen, für eine PCDD/F-Bildung im

Spurenbereich aber ausreichendem Maß vorhanden. Ebenso stehen geringe Mengen an katalytisch wirkendem Eisen bzw. Eisenoxid in der Praxis immer zur Verfügung.

Neben der „klassischen“ De-Novo-Synthese über Chlorierung von (elementarem) Kohlenstoff gibt es auch andere Bildungsmechanismen für PCDD/F, die auf dem Vorhandensein von chlorierten oder auch nicht chlorierten organischen Verbindungen basieren. Im Fall sogenannter „direkter“ Präkursoren, aus denen PCDD bzw. PCDF durch einfache Reaktionen entstehen können (sog. Präkursoren z.B. Chlorphenole, Chlorbenzole oder PCB) entstehen PCDD/F-Gemische mit charakteristischen Kongenerenmustern.

Da die genannten Randbedingungen im geplanten Anwendungsbereich der sorptiven Abgasentfeuchtung mit LiCl (T= 300 °C – 450 °C an der Kontaktstelle im Regenerator) liegen und prinzipiell Chlor aus dem LiCl zur PCDD/F-Bildung zur Verfügung steht, wurden Untersuchungen zur PCDD/F-Bildung durchgeführt.

Um die ermittelten Dioxin- und Furankonzentrationen interpretieren zu können, wurden die ermittelten Werte mit geeigneten Referenzen aus der Literatur verglichen.

Durchgeführte Versuche

Insgesamt wurden sechs Versuche durchgeführt, bei denen Proben zur PCDD/F-Messung entnommen wurden. Die Versuche, Parameter und die wichtigsten Ergebnisse sind in Tabelle 1-6 angegeben.

Tabelle 1-6: Übersicht der Versuche, Parameter und Ergebnisse

No.	description	T comb.	T sample	T LiCl-sol.	sample vol.	conc. LiCl	O2 cont.	CO cont.	PCDD/F mass	**PCDD/F conc.**
		°C	°C	°C	m³ STP		% vol. d.b.	mg/m³	pg I-TEQ	**ng/m³**
V0	reference	900	540	55	1,25	0 %		49	1060	**0,8**
V1	LiCl-solid 1	950	610	110	0,656	100 %	5,2	78	360	**0,5**
V2	LiCl-solid 2	920	600	125	0,6	100 %	15,0	1041	1230	**2,1**
V3	LiCl-brine 1	940	590	100	0,79	35 %	6,8	38	2210	**2,8**
V4	LiCl-brine 2	930	590	115	2,15	35 %	6,8	142	2060	**1,0**
V5	LiCl-brine 3	850	550	110	2,15	40 %	1,7	7500	1310	**0,6**

Bei den Versuchen wurden die Darreichungsform des LiCl (Feststoff/solid bzw. Sole/brine) sowie die Verbrennungsbedingungen (O_2-Gehalt) variiert, um die Bandbreite möglicher Betriebszustände abzubilden.

Bei allen Versuchen war am Filter Rußbildung festzustellen, so dass davon auszugehen ist, dass ausreichend Kohlenstoff für die De-Novo-Synthese zur Verfügung stand. Insofern dominiert der O_2-Einfluss auf die Dioxinbildung.

Referenzmessung ohne LiCl

Der Versuch V0 dient als Referenzmessung, bei der kein LiCl eingesetzt wurde. Die ermittelte Konzentration der PCDD/F (als internationales Toxizitätsäquivalent I-TEQ) in Höhe von 0,85 ng I-TEQ/m³ liegt im Bereich bekannter Werte, z. B. von THANNER et al. (2002) oder HEDMAN et al. (2006) und ist somit als plausibel anzusehen.

Das PCDD/F-Muster der Referenzmessung ist ähnlich zu einem von THANNER et al. (2002) veröffentlichten Muster für Holzverbrennung in einem Kaminofen und dem von PIEPER (2001) an einer 250 kW Unterschubfeuerung (Brennstoff: Holz) ermittelten Muster.

Aus der Musteranalyse der Referenzmessung (s. u.) ergibt sich, dass das Kongener 2,3,7,8 TCDF etwa 33 % zum I-TEQ beiträgt, das 2,3,4,7,8 PeCDF 28 % und das 2,3,7,8 TCDD rund 22 %. Alle anderen Kongenere tragen weniger als 5 % zum internationalen Toxizitätsäquivalent bei (Abbildung 1-25).

Versuche mit LiCl

Nachfolgend werden die Ergebnisse der PCDD/F-Untersuchungen von fünf Versuchen mit LiCl beurteilt, davon zwei mit LiCl-Feststoff (V1, V2) und drei mit LiCl-Sole (V3, V4, V5).

Allgemeines

Zwischen den Versuchen mit LiCl-Feststoff und LiCl-Sole ist kein Unterschied zu erkennen. Wie in Abbildung 1-22 dargestellt, folgt der Zusammenhang der PCDD/F-Konzentration und dem Sauerstoff einem schwachen Trend (R^2=0,287); Berücksichtigt man das Messergebnis von Versuch V3 (LiCl-Sole 1) nicht (möglicherweise ein Ausreißer), so ist der Trend hochsignifikant (R^2=0,897). Der Trend ist plausibel, da Sauerstoff als oxidierendes Agens für die Chlorierung organischer Verbindungen mit LiCl als Chlorquelle erforderlich ist.

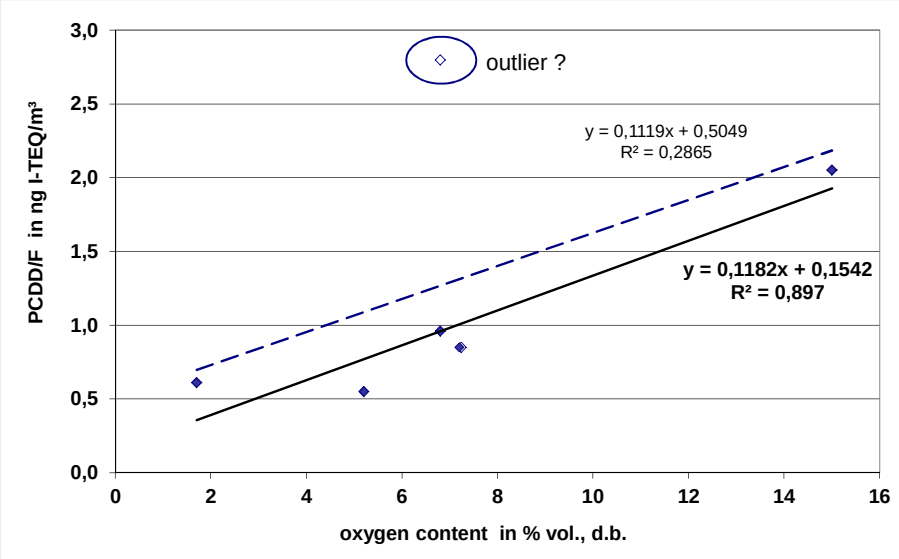


Abbildung 1-22: Zusammenhang zwischen PCDD/F-Konzentration (I-TEQ) und Sauerstoffgehalt, gestrichelte Trendlinie: alle Werte einbezogen

Musteranalyse

Bei der Referenzmessung war ein PCDD/F-Muster aufgetreten, das in der Literatur publizierten Mustern ähnlich ist (vgl. Abbildung 1-23). Im Gegensatz zum sogenannten „thermischen“ Muster, das hohe Anteile an Hepta- und Octachlor-Dibenzofuranen und –dioxinen aufweist (Fiedler, 2000), zeigen die Muster von Kleinfeuerungsanlagen einen Schwerpunkt beim 2,3,7,8–TCDF und nur geringe Anteile an hochchlorierten Kongeneren. Dies spricht dafür, dass die relativ geringe zur Verfügung stehende Chlormenge die PCDD/F-Bildung beschränkt.

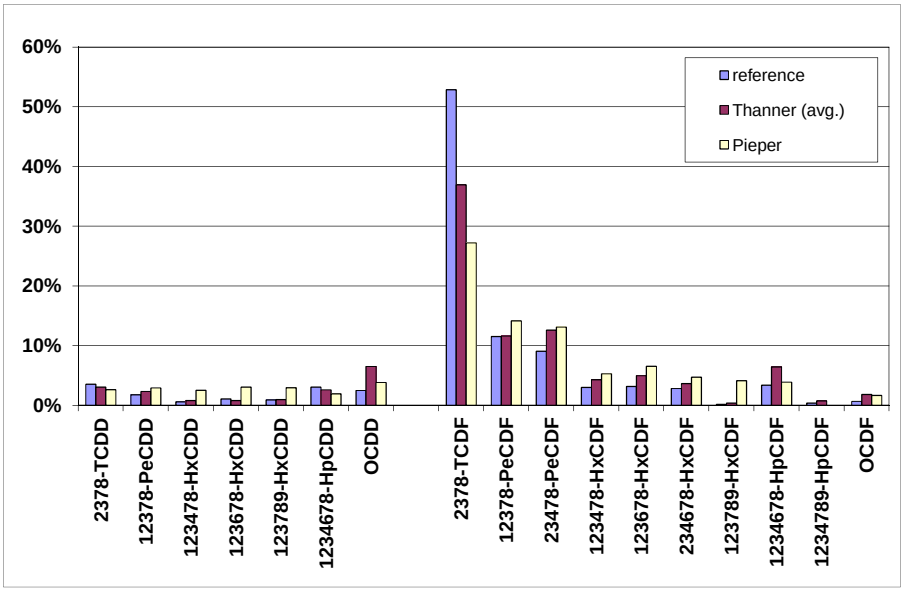


Abbildung 1-23: PCDD/F-Muster (massebezogen) der Referenzmessung im Vergleich zu publizierten Mustern von Holzfeuerungen

Im Gegensatz zu der für Holzverbrennung typischen Verteilung der Dibenzodioxine ist der Massenanteil der Hepta- und Oktachlordibenzodioxine bei den Versuchen mit LiCl deutlich erhöht, gleichzeitig ist der Anteil der mittel- und hochchlorierten Diebenzofurane höher als ohne LiCl. Das „typische Verbrennungsmuster mit hohem Anteil der thermodynamisch stabilen Hepta- und Oktadioxine und dem 1,2,3,4,6,7,8-Heptachlordibenzofuran wird aber nicht erreicht (vgl. Abbildung 1-24).

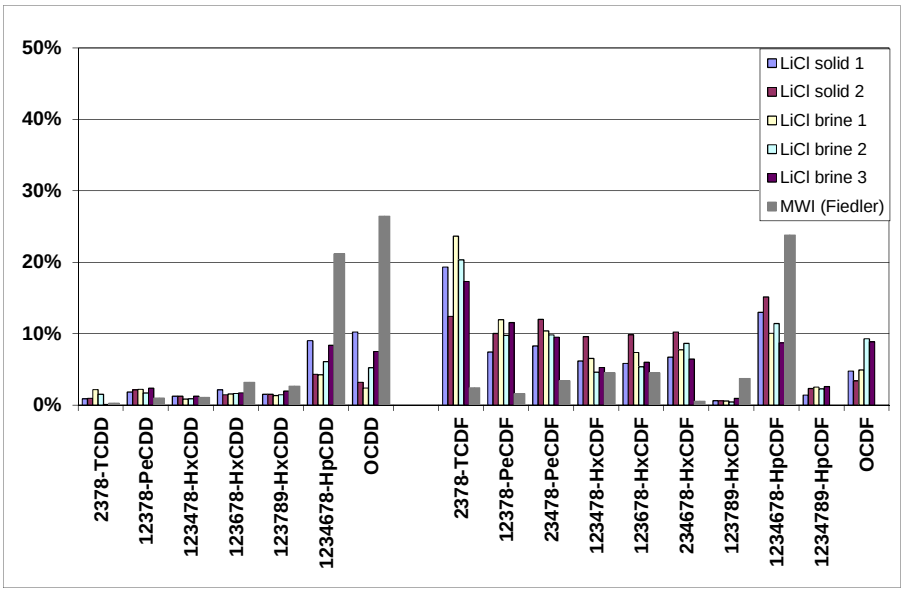


Abbildung 1-24: Muster der PCDD/F bei den Versuchen mit LiCl und Referenzmuster für thermische Prozesse (MVA, breite Säulen).

Das Muster der Dibenzofurane mit ähnlich großen Anteilen der einzelnen Kongenere weist hingegen darauf hin, dass nicht die De-Novo-Synthese sondern eine Bildung aus organischen Verbindungen aus der unvollständigen Verbrennung die Basis der gebildeten Dibenzofurane ist. Im Rahmen des Vorhabens konnten mögliche Reaktionsmechanismen jedoch nicht weitergehend untersucht werden.

Im Gegensatz zur Referenzmessung, bei der das 2378-TCDF-Kongener massemäßig weit überwiegt und auch den größten Anteil an den Toxizitätsäquivalenten trägt, hat dieses bei den Versuchen mit LiCl nur Anteile zwischen 12 % und 24 % an der Summe der Toxizitätsäquivalente.

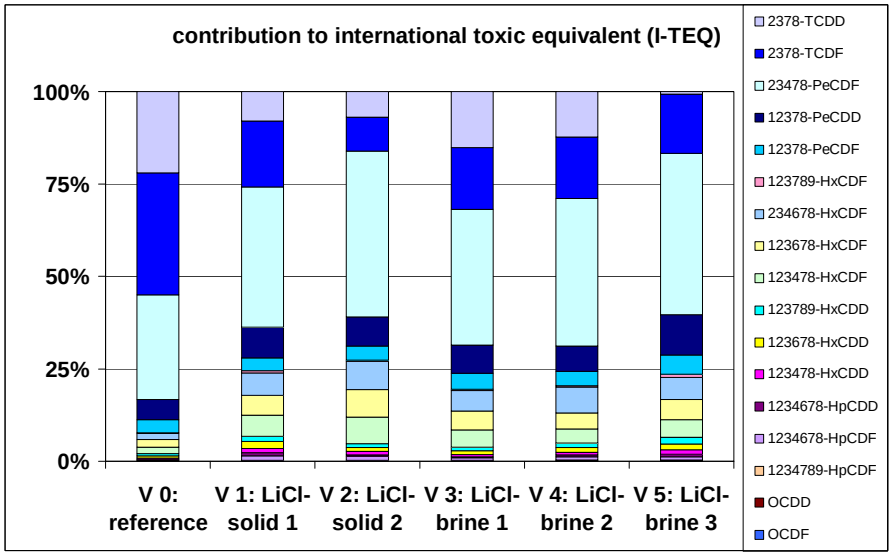


Abbildung 1-25: Beitrag der unterschiedlichen Kongenere zum I-TEQ

Massenkonzentration und Toxizität

Die Massenkonzentration der PCDD/F ohne Bewertung der Toxizität liegt in 4 von 5 Fällen über bzw. in 3 von 5 deutlich über der der Referenzmessung (Abbildung 1-26).

Das toxische Äquivalent der PCDD/F-Konzentrationen liegt in 3 von 5 Fällen über bzw. deutlich über der Referenzmessung (Abbildung 1-26).

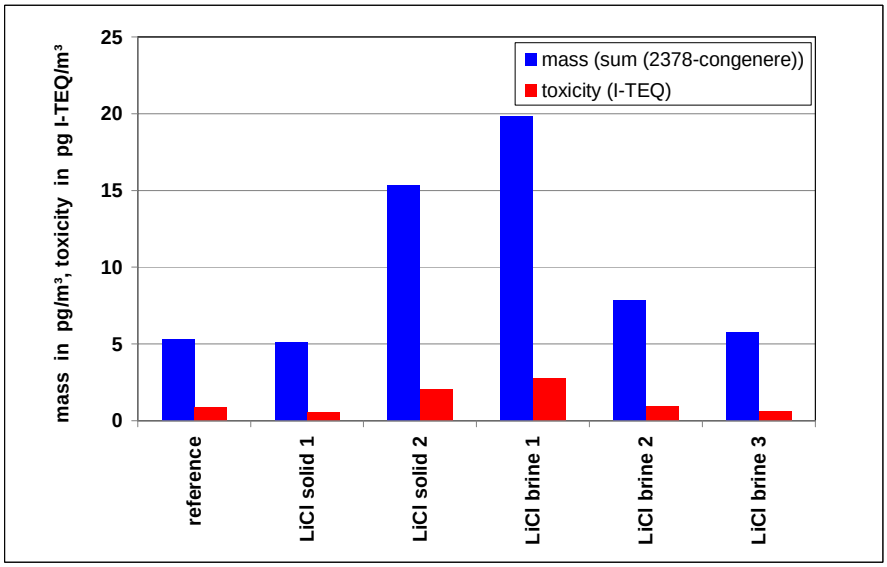


Abbildung 1-26: Massenkonzentrationen und Toxizitätsäquivalente (I-TEQ) der PCDD/F der durchgeführten Versuche

Die wichtigsten drei Beiträger zum toxischen Äquivalent tragen insgesamt mehr als 80 % bei der Referenzmessung und bis zu 70 % bei den Messungen mit LiCl zur Gesamttoxizität bei.

1.2.5 Fazit zur sorptiven Wärmeauskopplung aus dem Abgas

Der Prozess der Abgaskondensation mit Hilfe eines flüssigen Sorptionsmittels ist technisch prinzipiell machbar. Allerdings sind vor einer tatsächlichen Anwendung noch weitere Untersuchungen erforderlich, um die nachfolgend genannten bisherigen Einschränkungen zu überwinden.

Der technische Aufwand für den Aufbau der Laboranlage (Vermeidung von Katalysatoren zur Dioxinbildung, Verwendung korrosionsfester Nichteisenmetalle und Glasbauteile, elastische aber temperaturbeständige Abdichtung) ist vergleichsweise hoch.

Bei den Versuchen mit LiCl als Sorptionsmittel entstehen hochchlorierte PCDD/F-Kongenere in deutlich höherem Umfang als bei der Verbrennung von naturbelassenem Holz in Kleinfeuerungsanlagen.

Das PCDD/F-Toxizitätsäquivalent (I-TEQ) der Versuche mit LiCl steigt gegenüber der Referenzmessung geringfügig, das Muster sowie die Gesamtmasse der PCDD/F-Kongenere ändern sich jedoch deutlich. Die Zunahme an PCDD/F-Toxizitätsäquivalenten (I-TEQ) im Abgas ist geringer als die Massenzunahme der hochchlorierten Kongenere, weil diese relativ geringe Toxizitätsäquivalentfaktoren aufweisen.

2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der Kostenplan wurde eingehalten.

Ausgaben entstanden für Personal (ca. 90 %), Material, Betriebsstoffe und sonstige unmittelbare Vorhabenkosten (ca. 6 %), Investitionen (AfA ca. 2 %) sowie Dienstreisen (ca. 2 %). Der Personalaufwand war zur Erreichung der Projektziele angemessen und erforderlich.

Für den Aufbau und die Durchführung der Laborversuche wurden Material, Betriebsstoffe und Messgeräte (Investitionsgüter) im Rahmen des Bewilligungsbescheides beschafft.

Dienstreisen waren erforderlich für Arbeitstreffen im Rahmen der Methodenentwicklung (Vernetzung mit anderen Stellen), für die Teilnahme an den Statusseminaren im Rahmen des Förderprogramms sowie zur Veröffentlichung der Ergebnisse auf Tagungen und Konferenzen.

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeit

Bislang existierten nur wenige Ergebnisse zum Jahresnutzungsgrad von Holzpellet-Kleinfeuerungsanlagen bei realer Betriebsweise aus Felduntersuchungen (KUNDE et al., 2009 und SCHRAUBE et al., 2011). Da Felduntersuchungen aufwändig und vergleichsweise teuer sind und zudem auch ein langer Untersuchungszeitraum von mindestens einem Jahr pro Anlagenkonfiguration erforderlich ist, war es für weitergehende Untersuchungen in diesem Zusammenhang notwendig, ein geeignete Methode zu entwickeln um realistische Jahresnutzungsgrade innerhalb eines deutlich verkürzten Zeitraums ermitteln zu können. Die in diesem Vorhaben entwickelte Methode erfüllt dieses Ziel. Es kann innerhalb von etwa 6 Wochen ein belastbarer Jahresnutzungsgrad für eine Anlagenkonfiguration ermittelt werden. Der entwickelte Messzyklus dauert insgesamt 11 Messtage, wobei drei Wiederholungen zur statistischen Absicherung der Messergebnisse anzustreben sind und die einzelnen Experimente jeweils einer gewissen Vor- und Nachbereitungszeit bedürfen.

Die Methode ist auch geeignet, die gesamten Jahresemissionen z. B. an Feinstaub und Kohlenstoffmonoxid einer Holzpellet-KFA bei realistischer Betriebsweise unter Berücksichtigung aller auftretenden Betriebszustände zu ermitteln bzw. mit vergleichsweise guter Datenqualität abzuschätzen.

Um die bewilligten Fördermittel effizient einzusetzen, wurden zwei sehr unterschiedliche Holzpellet-KFA jeweils mit und ohne Pufferspeicherbetrieb untersucht. Dadurch kann die Bandbreite der Jahresnutzungsrade und der CO- sowie Staubemissionen von Holzpellet-KFA bei realistischer Betriebsweise dargestellt werden. Aus den Ergebnissen lässt sich dadurch das Optimierungs- bzw. Einsparpotential insbesondere von Bestandsanlagen (im Jahr 2011 ca. 165 000 Anlagen in Deutschland (DEPI, 2013)) ableiten.

Da zur Effizienzsteigerung auch Methoden zur Nutzung der latenten Wärme im Abgas interessant sein können, wurde im Arbeitspaket 2 eine neuartige Methode zur sorptiven Wärmeauskopplung aus dem Abgas hinsichtlich ihrer technischen Machbarkeit untersucht. Dazu wurde eine Laboranlage aufgebaut, um den Einsatz von LiCl-Sole als Sorptionsmittel zur Entfeuchtung des Abgases zu beurteilen. Hierbei wurde zunächst die mögliche Dioxinbildung betrachtet. Da diese Untersuchungen aufgrund der Dioxinproblematik deutlich aufwändiger waren, als bei Einreichung des Forschungsantrages geplant, konnten entgegen der ursprünglichen Planung aus finanziellen und zeitlichen Gründen keine weiteren Sorptionsmittel untersucht werden.

4 Nutzen und Verwertbarkeit

Das Forschungsvorhaben weist in verschiedener Hinsicht einen wertvollen Nutzen auf. Der Know-How-Gewinn wird durch entsprechende Publikationen für dritte nutzbar gemacht.

Insbesondere die Erkenntnisse zum Jahresnutzungsgrad zeigten nach erfolgter Publikation bei Fachveranstaltungen und Tagungen reges Interesse zunächst der Kesselhersteller. Dies zeigt, dass das Thema Energieeffizienz von Pellet-KFA in der Branche aufgenommen wurde. Entsprechend gewinnt die Steigerung des Jahresnutzungsgrades in der Entwicklung moderner mit Biomasse befeuerter Heizungsanlagen an Bedeutung.

Bei zukünftiger Berücksichtigung der Erkenntnisse aus dem Vorhaben in der Praxis und entsprechender Umsetzung werden die gesamte Branche sowie auch die Endverbraucher von der Effizienzsteigerung bei Holzpellet-KFA auch wirtschaftlich profitieren. Durch Erhöhung der Energieeffizienz sinkt der Brennstoffverbrauch bei gleich bleibendem Wärmebedarf. Dies führt zu Kosteneinsparung beim Endverbraucher. Der eingesparte Brennstoff steht dann für zusätzliche Anlagen zur Verfügung, d. h. es können zusätzliche Pellet-KFA abgesetzt und betrieben werden. Idealerweise sollten diese mit fossilen Brennstoffen beheizte KFA substituieren und so den Anteil Erneuerbarer Energien bei der Wärmeversorgung erhöhen.

Die Erkenntnisse zur Reduzierung der Emissionen aus KFA zeigen ein hohes volkswirtschaftliches Nutzungspotenzial auf.

5 Vorhabenrelevante Erkenntnisse von dritter Seite

Bis zum Vorhabenende wurden keine Erkenntnisse von dritter Seite bekannt, die für die Inhalte des Vorhabens relevant sind.

Allerdings wurden seit Vorhabenbeginn von verschiedenen anderen Instituten ebenfalls Untersuchungen zum Jahresnutzungsgrad durchgeführt, allerdings mit anderer Zielsetzung und anderen Methoden. Hierbei sind insbesondere drei Vorhaben zu erwähnen:

Concise Cycle Test (SPF Rapperswil)

Am Institut für Solartechnik SPF der Hochschule für Technik Rapperswil (Schweiz) wurde der so genannte Concise Cycle Test (CCT) entwickelt (HABERL et al., 2010). Dieser ist am ehesten mit der in diesem Vorhaben entwickelten Methode vergleichbar, da beim CCT ein 12-tägiger Prüfzyklus verwendet wird. Das SPF erläutert die Methode des CCT auf der Internetseite folgendermaßen:

Die „Concise Cycle Test“ Methode (CCT) ist eine speziell am SPF entwickelte dynamische Methode zur Prüfung von Kombisystemen. Sie basiert auf früheren und parallelen Arbeiten und Erfahrungen anderer Forschungsinstitute.

- *Prüfaufbau*

Das gesamte System wird inklusive der Nachheizung, der Hydraulik und der Regelung auf dem Indoor-Prüfstand des SPF installiert. Das Testgebäude und die Kollektoren im Solarkreis werden über steuerbare Wärmequellen und -senken in Echtzeit emuliert.

- *Prüfzyklus*

Um ein komplettes, solarkombiniertes Heizsystem im dynamischen Betrieb unter den im Laufe eines typischen Jahres auftretenden Randbedingungen zu testen, wurde ein spezieller 12-tägiger Prüfzyklus entwickelt. In dieser Zeit muss die gesamte Anlage realitätsgetreu ohne Eingriffe funktionieren, um die Last aus Heizung und Warmwasserbereitung zu decken.

- *Jahressimulationen*

Ein komplettes Simulationsmodell der Anlage wird erstellt und mit Hilfe der Messdaten abgeglichen. Mit Hilfe dieses Modells können jahresbasierte Kennwerte errechnet werden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, die Kennwerte von Systemvariationen ohne weitere praktische Tests zu berechnen und so das Verbesserungspotential zu identifizieren.

Die am SPF entwickelte Methode des CCT unterscheidet sich von der in diesem Projekt entwickelten. Am SPF wurde der Wärmebedarfsgang eines energetisch eher modernen (vergleichbar dem deutschen Energiestandard EnEV 2007) Einfamilienhauses (150 m² Wohnfläche, 15500 kWh/a Heizwärmebedarf, 2800 kWh/a Energiebedarf für Warmwasser) mit TRNSYS simuliert. Aus der Simulation wurden charakteristische Typtage abgeleitet und häufig auftretende Betriebszustände des Pelletkessels ermittelt. Diese Betriebszustände wurden am Prüfstand eingestellt und deterministische Emissionsmessungen durchgeführt, deren Ergebnisse wiederum in das TRNSYS-Modell als Parameter übernommen wurden. Letztlich basieren die emissionsspezifischen Aussagen auf deterministischen Einzelmessungen, die über eine Simulation auf Jahresemissionen hochgerechnet werden.

8+8 Stunden Versuchszyklus, bioenergy2020+ & TFZ Straubing

Von bioenergy2020+ und TFZ Straubing wurde ein Versuchszyklus entwickelt, der das Ziel hat, die Effizienz von Biomasse-Feuerungsanlagen unter Laborbedingungen vergleichend zu ermitteln. Die hier entwickelte Methode berücksichtigt nur den Heizkessel und ist bisher nur für den Betrieb ohne Pufferspeicher vorgesehen.

Der in HECKMANN et al. (2010) publizierte Versuchszyklus wurde in diesem Vorhaben exemplarisch angewendet. Der so genannte Referenzlastzyklus liefert Nutzungsgrade, die mit den in diesem Vorhaben ermittelten Typtag-Nutzungsgraden in der Übergangszeit vergleichbar sind. Der Volllastzyklus hingegen liefert Nutzungsgrade, die geringfügig über den Nutzungsgraden für den Typtag Winter in diesem Vorhaben ermittelt wurden. Insofern ist die Methode von bioenergy2020+ und TFZ Straubing für schnelle Analysen zur Vergleichbarkeit verschiedener Heizkessel geeignet, für tiefergehende Detailinformationen zum Betriebsverhalten eines Heizkessels ist die Methode aufgrund ihrer Kürze eher weniger geeignet.

EU-Projekt BioMaxEFF

Derzeit wird auch ein EU-Projekt mit dem Titel „BioMaxEff“ durchgeführt, in dem das Thema Energieeffizienz von Biomasse-KFA bearbeitet wird. (BioMaxEff, 2013)

Auf der Internetseite (Stand 15.05.2013) wird folgender Überblick über die Arbeitsinhalte gegeben:

BioMaxEff aims to advance small scale wood pellet and log boiler technologies beyond the current state of the art, delivering higher efficiencies, ultra-low emissions and greater market penetration in the period leading to 2020.

The project will see the development, intensive demonstration and wide market deployment of 10 innovative biomass heating concepts which have been designed and optimised for installation in three major biomass market segments:

- *New Build Housing (in particular prefabricated low energy houses)*
- *Refurbished Housing*
- *Boiler Exchange*

Well over 2,000 heating systems will be installed over the course of BioMaxEff and a range of technological and market advances are anticipated, these include:

- *Exceeding current annual biomass boiler efficiencies of 70 % by a further 20 % in the lifetime of the project and paving the way to a 25 % increase (on 70 %) by 2020.*
- *Demonstrating that high performance log wood combustion technology does not necessarily require a fan. (The project will introduce one high efficiency, low emission, and low cost log wood boiler to the Southern European market).*
- *Achieving lower Total Suspended Particle (TSP) emissions in field tests than any of the current top performing biomass boiler appliances in the EU market.*
- *Demonstrating that biomass heating systems are a viable solution for low and lowest energy demand buildings by developing a heating system with outstanding load control and minimal heat output (as low as 1.6kW).*

Leider ergab eine Anfrage beim Projektkoordinator keine weiteren Informationen zum Projektinhalt oder derzeitigen Stand.

6 Veröffentlichungen

Bisher erfolgte Veröffentlichungen

1. Poster mit ersten Zwischenergebnissen, europäische Biomassekonferenz in Berlin, 2011
2. Poster, Jahrestagung 2011 des Forschungsverbandes Erneuerbare Energien (FVEE)
3. Vortrag, 16. Sitzung des Arbeitskreises Holzfeuerung am TFZ Straubing, 2012
4. Poster, europäische Biomassekonferenz in Mailand, 2012, siehe Anhang
5. Vortrag, 12. Industrieforum Holzpellets in Berlin, 2012

Weitere geplante Veröffentlichungen

1. Vortrag, 17. Sitzung des Arbeitskreises Holzfeuerung am TFZ Straubing, 2013
2. wissenschaftliche Publikation der Ergebnisse zum Jahresnutzungsgrad und den Jahresemissionen z. B. in Biomass & Bioenergy
3. Publikation in der Fachzeitschrift Pellets – markt und trends (voraussichtlich Oktober 2013)
4. wissenschaftliche Publikation der Ergebnisse zur Dioxin-/Furanbildung bei sorptiver Wärmeauskopplung mittels LiCl z.B. in Chemosphere

Garching, 29.05.2013

Dr. Jens M. Kuckelkorn	Robert Kunde
(Gruppenleiter)	(Projektleiter)

Literatur / Quellennachweis

1. BImSchV, 2010	Deutscher Bundestag: Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes, Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen - 1. BImSchV, 26. Januar 2010, BGBl. I S. 38
BioMaxEff, 2013	www.biomaxeff.eu, Stand 15.03.2013
DEPI, 2013	Deutsches Pelletinstitut GmbH: Persönliche Auskunft, April 2013
DIN EN 12831, 2008	Deutsches Institut für Normung: Deutsche Fassung der EN 12831 (2003 und 2008). Heizungsanlagen in Gebäuden – Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast, Berlin: Beuth Verlag
EES	Software EES, Engineering Equation Solver, Version 8.463-3D, TRANSSOLAR Energietechnik GmbH, Stuttgart, www.trnsys.de. Seit 2012: F-Chart Software LLC., Madison, Wisconsin, USA; www.fchart.com/ees/
EN 303-5, 1999	Europäische Norm EN 303 (deutsche Fassung), Heizkessel, Teil 5: Heizkessel für feste Brennstoffe, hand- und automatisch beschickte Feuerungen, Nenn-Wärmeleistung bis 300 kW, Berlin: Beuth Verlag, 1999
Fiedler et al., 2000	Fiedler, H., Lau, C. & Eduljee, G.: Statistical analysis of patterns of PCDDs and PCDFs in stack emission samples and identification of a marker congener. Waste Management and Research 18 (3), 2000, S. 283–292
FNR, 2001	Fachagentur Nachwachsender Rohstoffe (Hrsg.): Eigenschaften biogener Festbrennstoffe (2001). Nachwachsende Rohstoffe, Bd. 17, Münster, Landwirtschaftsverlag GmbH, ISBN 3-7843-3104-1
Haberl et al., 2010	Haberl, R., Konersmann, L. & Frank, E. : Erweiterte Systembewertung mit dem Concise Cycle Test am Beispiel von PelletSolar, Tagungsband 20. OTTI-Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein, 2010
Heckmann et al., 2010	Heckmann, M., Rossmann, P., Baumgartner, H. & Themessl, A.: Bestimmung von Jahresnutzungsgrad und Emissionsfaktoren von Biomasse-Kleinfeuerungen am Prüfstand; Projektendbericht, 2010 www.bioenergy2020.eu/files/publications/pdf/815650_Jahresnutzungsgrad_Endbericht.pdf

Hedman et al., 2006 — Hedman, B. et al.. Emission of PCDD/F, PCB, and HCB from Combustion of Firewood and Pellets in Residential Stoves and Boilers, Environ. Sci. Technol., 40, 2006, S. 4968-4975

Kunde et al., 2007 — Kunde, R., Gaderer, M., Schmoeckel, G. et al.: Endbericht zum Forschungsvorhaben LfU 0103301049, Praxistest zur Erhebung der Emissionssituation von Pelletfeuerungen im Bestand, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg, 2007

Kunde et al., 2008 — Kunde, R., Volz, F. & Gaderer, M. : Emissions- und Leistungsmessungen an Pelletheizungen im Bestand, 8. Industrieforum Pellets, Stuttgart, 2008

Kunde et al., 2009 — Kunde, R., Volz, F., Gaderer, M. & Spliethoff, H.: Felduntersuchungen an Pellet-Zentralheizungsanlagen, BWK Das Energiefachmagazin 1-2, 2009, S. 58-66

Launhardt et al., 1998 — Launhardt, Th. et al.: Dioxin- und PAK- Konzentrationen in Abgas und Aschen von Stückholzfeuerungen, München, Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, 1998

Nussbaumer, 2004 — Nussbaumer, Th.: Dioxin- und PAK-Emissionen der privaten Abfallverbrennung, Umwelt-Materialien Nr. 172, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Schweiz, Bern, 2004

Jagnow et al., 2012 — Jagnow, K. & Wolf, D.: Abschlussbericht des Projekts OPTIMUS, Optimierung von Heizungssystemen, 2012, www.optimus-online.de

Pieper, 2001 — Pieper, A.: Untersuchungen zur Schadstoffbildung und Emissionsminderung bei der energetischen Verwertung von Resthölzern in Kleinfeuerungsanlagen, Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 2001

Schnelle-Kreis et al., 2008 — Schnelle-Kreis, J., Zimmermann, R., Gaderer, M., Kunde, R., Schmoeckel, G. et al.: Einfluss der Gebäudeheizungen auf die Feinstaub-Immissionen im Raum Augsburg, Forschungsvorhaben U47 des StMUGV, LfU-Fachtagung 23.10.2008, Augsburg, 2008

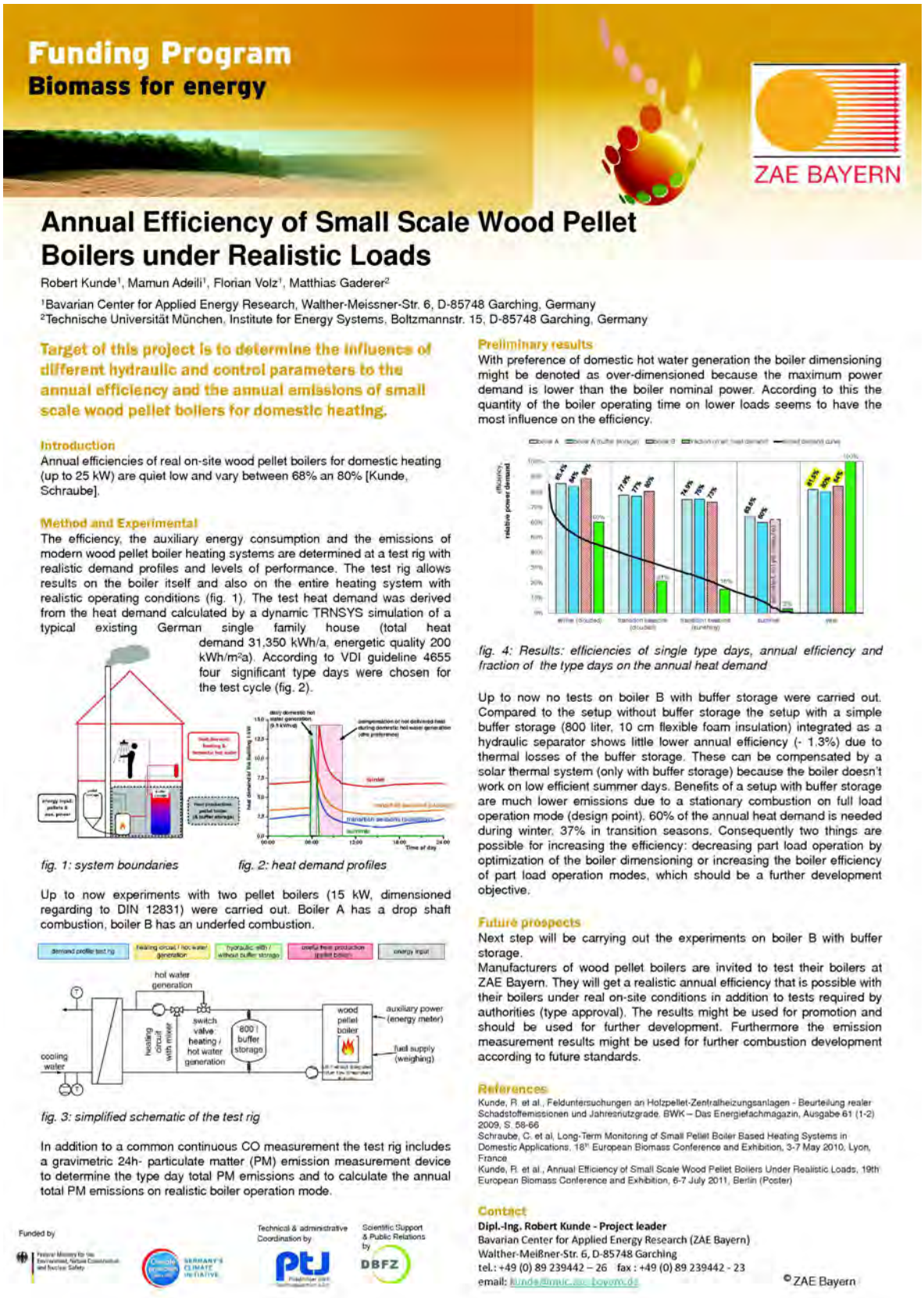
Schraube et al., 2011 — Schraube, C., Jung, T. & Mabilat, C.: Feldversuche mit kleinen Pelletkesseln – Untersuchung der Jahresnutzungsgrade, Konferenzbeitrag IBC Leipzig, 2011

Thanner et al., 2002 — Thanner, G. & Moche, W.: Emissionen von Dioxinen, PCBs und PAHs aus Kleinfeuerungen, Monographien Band 153, Umweltbundesamt GmbH Österreich, Wien, 2002

Thrän et al., — Thrän, D. & Fischer, E.: Methodenhandbuch – Stoffstromorientierte

2011	Bilanzierung der Klimagaseffekte, Schriftenreihe des BMU-Förderprogramms „Energetische Biomassenutzung“, Bd. 4. Version 2.1. Aufl. Leipzig: DBFZ, 2011 – ISBN: 2192 - 1806
TRNSYS	Software TRNSYS, Version 16.1., TRANSSOLAR Energietechnik GmbH, Stuttgart, www.trnsys.de
VDI 2066-1, 2006	Verein Deutscher Ingenieure: Richtlinie 2066 - Teil 1: Messen von Partikeln - Staubmessungen in strömenden Gasen - Gravimetrische Bestimmung der Staubbeladung, Beuth Verlag, Berlin, 2006
VDI 4655, 2008	Verein Deutscher Ingenieure.: Richtlinie 4655, Referenzlastprofile von Ein- und Mehrfamilienhäusern für den Einsatz von KWK-Anlagen, Beuth Verlag, Berlin, 2008

A Anhang



Funding Program
Biomass for energy

ZAE BAYERN

Annual Efficiency of Small Scale Wood Pellet Boilers under Realistic Loads

Robert Kunde[1], Mamun Adeili[1], Florian Volz[1], Matthias Gaderer[2]

[1]Bavarian Center for Applied Energy Research, Walther-Meissner-Str. 6, D-85748 Garching, Germany
[2]Technische Universität München, Institute for Energy Systems, Boltzmannstr. 15, D-85748 Garching, Germany

Target of this project is to determine the influence of different hydraulic and control parameters to the annual efficiency and the annual emissions of small scale wood pellet boilers for domestic heating.

Introduction

Annual efficiencies of real on-site wood pellet boilers for domestic heating (up to 25 kW) are quiet low and vary between 68% an 80% [Kunde, Schraube].

Method and Experimental

The efficiency, the auxiliary energy consumption and the emissions of modern wood pellet boiler heating systems are determined at a test rig with realistic demand profiles and levels of performance. The test rig allows results on the boiler itself and also on the entire heating system with realistic operating conditions (fig. 1). The test heat demand was derived from the heat demand calculated by a dynamic TRNSYS simulation of a typical existing German single family house (total heat demand 31,350 kWh/a, energetic quality 200 kWh/m²a). According to VDI guideline 4655 four significant type days were chosen for the test cycle (fig. 2).

fig. 1: system boundaries *fig. 2: heat demand profiles*

Up to now experiments with two pellet boilers (15 kW, dimensioned regarding to DIN 12831) were carried out. Boiler A has a drop shaft combustion, boiler B has an underfed combustion.

fig. 3: simplified schematic of the test rig

In addition to a common continuous CO measurement the test rig includes a gravimetric 24h- particulate matter (PM) emission measurement device to determine the type day total PM emissions and to calculate the annual total PM emissions on realistic boiler operation mode.

Preliminary results

With preference of domestic hot water generation the boiler dimensioning might be denoted as over-dimensioned because the maximum power demand is lower than the boiler nominal power. According to this the quantity of the boiler operating time on lower loads seems to have the most influence on the efficiency.

fig. 4: Results: efficiencies of single type days, annual efficiency and fraction of the type days on the annual heat demand

Up to now no tests on boiler B with buffer storage were carried out. Compared to the setup without buffer storage the setup with a simple buffer storage (800 liter, 10 cm flexible foam insulation) integrated as a hydraulic separator shows little lower annual efficiency (- 1.3%) due to thermal losses of the buffer storage. These can be compensated by a solar thermal system (only with buffer storage) because the boiler doesn't work on low efficient summer days. Benefits of a setup with buffer storage are much lower emissions due to a stationary combustion on full load operation mode (design point). 60% of the annual heat demand is needed during winter, 37% in transition seasons. Consequently two things are possible for increasing the efficiency: decreasing part load operation by optimization of the boiler dimensioning or increasing the boiler efficiency of part load operation modes, which should be a further development objective.

Future prospects

Next step will be carrying out the experiments on boiler B with buffer storage.
Manufacturers of wood pellet boilers are invited to test their boilers at ZAE Bayern. They will get a realistic annual efficiency that is possible with their boilers under real on-site conditions in addition to tests required by authorities (type approval). The results might be used for promotion and should be used for further development. Furthermore the emission measurement results might be used for further combustion development according to future standards.

References

Kunde, R. et al., Felduntersuchungen an Holzpellet-Zentralheizungsanlagen - Beurteilung realer Schadstoffemissionen und Jahresnutzgrade. BWK – Das Energiefachmagazin, Ausgabe 61 (1-2) 2009, S. 58-66
Schraube, C. et al, Long-Term Monitoring of Small Pellet Boiler Based Heating Systems in Domestic Applications. 18th European Biomass Conference and Exhibition, 3-7 May 2010, Lyon, France
Kunde, R. et al., Annual Efficiency of Small Scale Wood Pellet Boilers Under Realistic Loads, 19th European Biomass Conference and Exhibition, 6-7 July 2011, Berlin (Poster)

Contact

Dipl.-Ing. Robert Kunde - Project leader
Bavarian Center for Applied Energy Research (ZAE Bayern)
Walther-Meißner-Str. 6, D-85748 Garching
tel.: +49 (0) 89 239442 – 26 fax : +49 (0) 89 239442 - 23
email: kunde@mail.zae-bayern.de

Funded by
Technical & administrative Coordination by
Scientific Support & Public Relations by
© ZAE Bayern

Abbildung A-1: Posterbeitrag auf der europäischen Biomassekonferenz in Mailand (18.-22. Juni 2012)