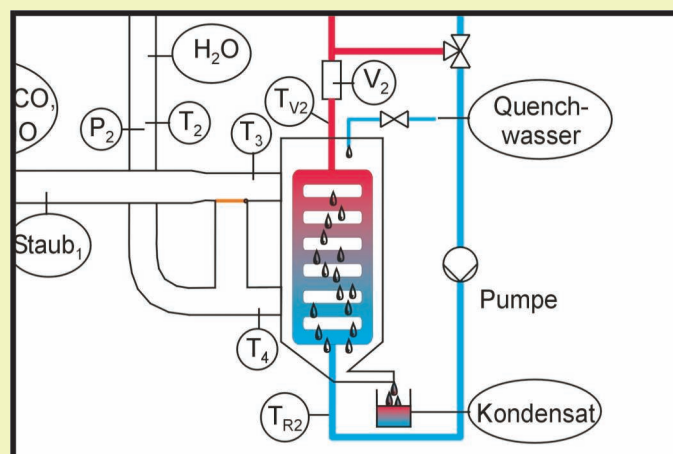




## Berichte aus dem TFZ

# Erprobung der Brennwerttechnik

bei häuslichen Holzhack-  
schnittzelfeuerungen mit  
Sekundärwärmetauscher



# **Erprobung der Brennwerttechnik bei häuslichen Holz- hackschnitzelfeuerungen mit Sekundärwärmetauscher**





# **Erprobung der Brennwerttechnik bei häuslichen Holzhackschnit- zelfeuerungen mit Sekundär- wärmetauscher**

Dr. Hans Hartmann  
Dipl.-Phys. Paul Roßmann  
Dipl.-Ing. (FH) Heiner Link  
Dipl.-Ing. (FH) Alexander Marks

**Berichte aus dem TFZ 2**

Straubing, November 2004

**Titel:** Erprobung der Brennwerttechnik bei häuslichen  
Holzhackschnitzelfeuerungen mit Sekundärwärmetauscher

**Autoren:** Dr. Hans Hartmann  
Paul Roßmann  
Heiner Link  
Alexander Marks

**in Kooperation mit:** Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (LfU) in Augsburg (Durchführung  
von Kondensatanalysen)  
Fa. HDG in Massing (Bereitstellung einer Hackschnitzelfeuerung)

**Auftraggeber:** Firma BOMAT Heiztechnik GmbH  
Rengoldshausener Straße 4, D-88662 Überlingen

**Förderung:** Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU), Osnabrück

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

© 2004  
Technologie- und Förderzentrum (TFZ)  
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, Straubing

Alle Rechte vorbehalten.  
Kein Teil dieses Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Herausgebers in irgendeiner Form  
reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt, verbreitet oder  
archiviert werden.

**ISSN:** 1614-1008

**Hrsg.:** Technologie- und Förderzentrum (TFZ)  
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe  
Schulgasse 18, 94315 Straubing  
**E-Mail:** [poststelle@tfz.bayern.de](mailto:poststelle@tfz.bayern.de)  
**Internet:** [www.tfz.bayern.de](http://www.tfz.bayern.de)

**Redaktion:** Dr. H. Hartmann, P. Roßmann, H. Link, A. Marks  
**Verlag:** Eigenverlag TFZ  
**Erscheinungsort:** Straubing  
**Erscheinungsjahr:** 2004  
**Gestaltung:** Dr. H. Hartmann, P. Roßmann, H. Sporrer  
**Fotonachweis:** Fa. Bomat: Abbildung 4, TFZ: Abbildung 5

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>		<b>5</b>
<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>		<b>7</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>		<b>9</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung und Zielsetzung .....</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>Methodisches Vorgehen.....</b>	<b>15</b>
<b>2.1</b>	<b>Versuchsprogramm .....</b>	<b>15</b>
<b>2.2</b>	<b>Versuchsbrennstoffe.....</b>	<b>17</b>
<b>2.3</b>	<b>Versuchsaufbau und Messanordnung .....</b>	<b>19</b>
<b>2.4</b>	<b>Mess- und Analyseverfahren .....</b>	<b>23</b>
<b>2.5</b>	<b>Versuchsdurchführung und Auswertung.....</b>	<b>26</b>
<b>3</b>	<b>Ergebnisse .....</b>	<b>29</b>
<b>3.1</b>	<b>Wirkungsgrad- und Leistungssteigerung.....</b>	<b>29</b>
<b>3.2</b>	<b>Wirkungen auf den Staubausstoß .....</b>	<b>33</b>
<b>3.3</b>	<b>Wirkungen auf die übrigen Schadstoffemissionen .....</b>	<b>37</b>
<b>3.4</b>	<b>Kondensatmengenanfall.....</b>	<b>38</b>
<b>3.5</b>	<b>Kondensatqualität .....</b>	<b>40</b>
<b>4</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>43</b>
<b>5</b>	<b>Quellenverzeichnis .....</b>	<b>45</b>
<b>6</b>	<b>Anhang: Zusammenstellung der Messdaten .....</b>	<b>47</b>



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Bei der Verbrennung gebildetes Wasser aus 1 kg Fichtenholz mit unterschiedlichem Brennstoff-Wassergehalt; Werte bezogen auf 1 kg Brennstoffmasse feucht (links) bzw. auf eine Kilowattstunde Brennstoffenergie (rechts). Verrechnerter Wasserstoffgehalt im Brennstoff: 6,2 % i.d. TM.....	11
Abbildung 2:	Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus und der Messstellenanordnung mit Abgasführung und Wärmeleistungsmessstrecken .....	20
Abbildung 3	Prinzip des getesteten Sekundärwärmetauschers.....	21
Abbildung 4:	Außen- und Innenansicht des verwendeten Sekundärwärmetauschers .....	22
Abbildung 5:	Ablagerungen auf der ersten Ebene der Wärmetauscherrohre (Betrieb mit Holzhackschnitzel) .....	22
Abbildung 6:	Schematische Darstellung des Messgeräteaufbaus auf dem Prüfstand des Technologie- und Förderzentrums.....	24
Abbildung 7:	Systemwirkungsgrad des Hackschnitzelkessels mit Sekundärwärmetauscher bei verschiedenen Rücklauftemperaturen und Brennstoffwassergehalten. Alle Messungen wurden bei ca. 60 kW Heizleistung durchgeführt. Mittelwertdarstellung für jeweils drei Wiederholungsmessungen. ....	29
Abbildung 8:	Systemwirkungsgrad des Hackschnitzelkessels mit Sekundärwärmetauscher bei verschiedenen Brennstoffen. Alle Messungen wurden bei ca. 10 % Brennstoffwassergehalt, ca. 60 kW Heizleistung und 20 °C Rücklauftemperatur durchgeführt. Mittelwertdarstellung für jeweils drei Wiederholungsmessungen. ....	30
Abbildung 9:	Systemwirkungsgrad des Hackschnitzelkessels mit Sekundärwärmetauscher bei verschiedenen Heizlasten und Rücklauftemperaturen. Mittelwertdarstellung für jeweils drei Wiederholungsmessungen. ....	31
Abbildung 10:	Schematische Darstellung des Energieflusses einer Brennwertfeuerung für Holzbrennstoffe angegeben in Prozentpunkten bezogen auf die zugeführte Brennstoffenergie .....	32
Abbildung 11:	Leistungssteigerung eines Holzhackschnitzelkessels durch Verwendung eines Sekundärwärmetauschers bei verschiedenen Rücklauftemperaturen und Brennstoffwassergehalten. Mittelwertdarstellung für jeweils drei Wiederholungsmessungen. ....	33
Abbildung 12:	Staub-Emissionsminderung durch Einsatz des Sekundärwärmetauschers mit Kondensationsbetrieb bei verschiedenen Brennstoffwassergehalten und verschiedenen Rücklauftemperaturen. Alle Messungen wurden bei ca. 60 kW Heizleistung durchgeführt. Mittelwertdarstellung für jeweils drei Wiederholungsmessungen. ....	34

Abbildung 13: Staub-Emissionsminderung durch Einsatz des Sekundärwärmetauschers mit Kondensationsbetrieb bei verschiedenen Versuchsbrennstoffen. Alle Messungen wurden bei ca. 10 % Brennstoffwassergehalt, ca. 60 kW Heizleistung und 20 °C Rücklauftemperatur durchgeführt. Mittelwertdarstellung für jeweils drei Wiederholungsmessungen .....35

Abbildung 14: Staub-Emissionsminderung durch Einsatz des Sekundärwärmetauschers mit Kondensationsbetrieb bei verschiedenen Heizleistungen, Rücklauftemperaturen und Brennstoffwassergehalten. Mittelwertdarstellung für jeweils drei Wiederholungsmessungen .....36

Abbildung 15: Staub-Emissionsminderung durch Einsatz des Sekundärwärmetauschers mit Kondensationsbetrieb bei der Zugabe von Quenchwasser. Alle Messungen wurden bei ca. 10 % Brennstoffwassergehalt und ca. 60 kW Heizleistung durchgeführt. Mittelwertdarstellung für jeweils drei Wiederholungsmessungen .....37

Abbildung 16: Spezifischer Kondensatanfall durch den eingesetzten Sekundärwärmetauscher bezogen auf die vom Kessel abgegebene Wärme: Einfluss verschiedener Hackschnitzel-Wassergehalte und Rücklauftemperaturen. Alle Messungen wurden bei 60 kW Heizleistung durchgeführt.....38

Abbildung 17: Spezifischer Kondensatanfall durch den eingesetzten Sekundärwärmetauscher bezogen auf die vom Kessel abgegebene Wärme: Einfluss verschiedener Brennstoffarten. Alle Messungen wurden bei 60 kW Heizleistung und mit einem einheitlichen Brennstoffwassergehalt von ca. 10 % durchgeführt. ....39

Abbildung 18: Spezifischer Kondensatanfall durch den eingesetzten Sekundärwärmetauscher bezogen auf die vom Kessel abgegebene Wärme: Einfluss der verschiedenen Heizlasten bei verschiedenen Brennstoffwassergehalten und Rücklauftemperaturen .....40

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Versuchsplan.....	16
Tabelle 2:	Verwendete Versuchsbrennstoffe und deren Wassergehalt.....	17
Tabelle 3:	Heizwert und Elementgehalte der verwendeten Brennstoffe (Datenbankangaben [7]) .....	18
Tabelle 4:	Analyse der verwendeten Versuchsbrennstoffe, ohne Miscanthus. Analysendurchführung: Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (LfU) mittels Röntgenfluoreszenzanalyse. Die mit "<" gekennzeichneten Werte stellen die Nachweisgrenze dar.....	18
Tabelle 5:	Vergleichswerte für kritische Inhaltsstoffe nach NAWARO Datenbank [7], Mittelwerte und Bandbreite (in Klammern) .....	19
Tabelle 6:	Kontinuierlich erfasste Messgrößen – Technische Daten der Messgeräte .....	25
Tabelle 7:	Schwermetallkonzentrationen im Kondensat der verschiedenen untersuchten Biomassebrennstoffe und Übereinstimmung mit Begrenzungen bzw. Richtwerten in Deutschland und Österreich .....	41
Tabelle 8:	Gemessene Gehaltskonzentrationen an kritischen Elementen und pH-Wert im Kondensat .....	42



# 1 Einleitung und Zielsetzung

Der Wirkungsgrad von häuslichen Holzfeuerungsanlagen liegt, je nach Brennstoffqualität und – feuchte, im Bereich von 85 bis 90 %, bezogen auf den unteren Heizwert  $H_{u}$ . Mit ca. 150 bis 250 °C liegt die Abgastemperatur hierbei in einem Bereich, in dem es in der Regel nicht zu einer Unterschreitung des Taupunkts im Abgas kommt. Durch den Einsatz von Heizungsanlagen mit „Brennwerttechnik“ lassen sich die Wirkungsgrade der Wärmebereitstellung gegenüber konventionellen Techniken deutlich steigern. Hierbei wird mittels eines entsprechend ausgelegten Wärmetauschers zum einen die sensible (fühlbare) Wärme des Rauchgases durch Abkühlen auf im allgemeinen 40 bis 70 °C genutzt und zum anderen dem Rauchgas die latente (Kondensations-) Wärme entzogen. In der Regel werden damit Kesselwirkungsgrade erzielt, die über 100 % liegen (bezogen auf den unteren Heizwert  $H_{u}$ ). Bei Erdgasfeuerungen und mittlerweile auch bei Heizölkesseln ist die Brennwerttechnik bereits praxisüblich. Dies gilt jedoch nicht für Holzfeuerungen, obgleich auch hier günstige Voraussetzungen für den Einsatz der Brennwerttechnik gegeben sind.

Dazu ist einerseits eine vorhandene Nutzungsmöglichkeit für die zusätzlich gewonnene Niedertemperaturwärme und andererseits ein nennenswerter Wasserdampfgehalt im Abgas erforderlich. Dieser Wasserdampfgehalt stammt bei der Holzverbrennung sowohl aus dem Wassergehalt im Brennstoff (ca. 10 bis 40 %) als auch aus dem Wasserstoffanteil im Brennstoff (ca. 6 Gew.-%), der sich im Verbrennungsprozess mit Sauerstoff zu Wasserdampf verbindet (sog. "Knallgasreaktion"). Dieses chemisch gebildete Wasser beträgt bei Holzbrennstoffen insgesamt ca. 110 bis 120 g je kWh Brennstoff. Bei ca. 35 % Wassergehalt (w) im Brennstoff liegen die chemisch gebildete Wassermasse und die aus der Verdampfung des im Brennstoff enthaltenen Wassers stammenden Wassermasse etwa gleichauf (Abbildung 1). In der Summe ist bei lufttrockenem Holzbrennstoff (bis  $w=20\%$ ) mit ca. 150 g Wasser je Kilowattstunde Brennstoffenergie zu rechnen. Bezogen auf die Holzmasse sind das ca. 0,65 kg Wasser je kg Brennstoff (inkl. Wasser).

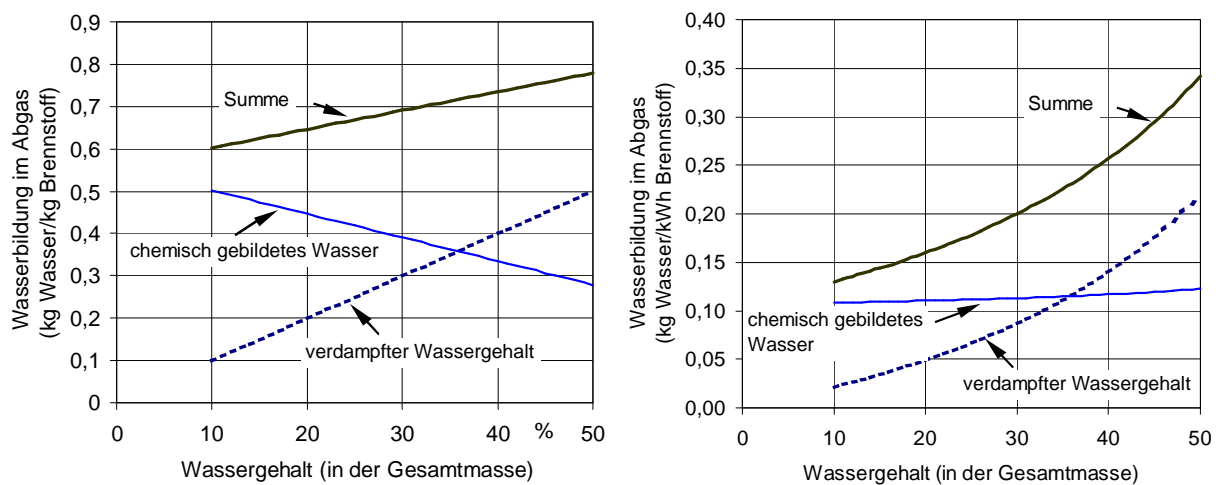


Abbildung 1: Bei der Verbrennung gebildetes Wasser aus 1 kg Fichtenholz mit unterschiedlichem Brennstoff-Wassergehalt; Werte bezogen auf 1 kg Brennstoffmasse feucht (links) bzw. auf eine Kilowattstunde Brennstoffenergie (rechts). Verrechneter Wasserstoffgehalt im Brennstoff: 6,2 % i.d. TM

Bei feuchten Brennstoffen stammt der mit der Brennwerttechnik durch zusätzliche Abkühlung gewinnbare Wärmeertrag zum größten Teil aus der latenten Wärme der Kondensation des im Abgas enthaltenen Wasserdampfs (2,44 MJ Wärme pro kg Wasser). Rechnerisch liegt der energetische Wert der Kondensationswärme bei einer Holzfeuerung mit ca. 8 bis 15 % des Brennstoffeinsatzes höher als beim Einsatz von Heizöl. Die zusätzlich gewinnbare sensible Energie macht – abhängig von der Abgastemperatur – weitere 7 bis 15 % Wärmeertrag aus (bezogen auf die Brennstoffenergie nach dem unteren Heizwert  $H_u$ )

Hinsichtlich der Emissionsbegrenzung bzw. -minderung kommt der Minimierung der Staubemissionen bei der Holzverbrennung besondere Bedeutung zu. Dies ist auch aus der Bilanz der Schornsteinfegerinnung aus den Jahren 2000/2001<sup>1</sup> zu erkennen, die zeigt, dass mehr als 20 % aller mit Naturholz bestückten Anlagen die Grenzwerte der 1. BImSchV nicht einhalten können. Erfahrungen mit größeren Feuerungsanlagen im Kondensationsbetrieb zeigen, dass mit dem Kondensatanfall auch eine Abscheidung solcher Stäube möglich ist, zumal die Kondensation durch das Vorhandensein von Kondensationskeimen verbessert wird. Mit den kleineren Anlagenleistung der häuslichen Holzfeuerungen liegen jedoch hierzu bislang noch keine Erfahrungen vor.

**Zielsetzung.** Im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes sollte ein Sekundärwärmetauscher zur Kondensationswärmegewinnung und Staubemissionsminderung für Holzfeuerungsanlagen kleinerer Leistung unter praxisnahen Bedingungen erprobt werden. Ziel der Untersuchung war die Feststellung der für eine Verfahrensbeurteilung wichtigen Merkmale wie

- Leistungs- und Wirkungsgradsteigerung,
- Emissionsminderung (Staub, CO,  $C_nH_m$ , NO) sowie
- Kondensatmenge und -qualität.

Beim Wirkungsgrad sollten die Wärmeerträge durch Kondensation (latente Wärme) und durch weitere Abkühlung der Abgase (sensible Wärme) unterschieden werden. Beim Schadstoffausstoß lag das Hauptaugenmerk auf dem Parameter Staub, da es sich hierbei um den am meisten kritischen Schadstoff der Biomasseverbrennung handelt. Mögliche Optimierungen für diesen Parameter sollten durch Untersuchung einer Quenchwasserzugabe (Frischwassereindüsung in den Abgasweg vor dem Sekundärwärmetauscher) identifiziert werden. Zudem sollten Kondensatmenge und -qualität detailliert bestimmt werden, um so die Möglichkeiten einer umweltgerechten Entsorgung über das Abwassersystem beurteilen zu können.

Neben diesen Betriebsparametern sollten im Rahmen der vorliegenden Untersuchung auch weitere für die praktische Anwendung der Brennwerttechnik wichtige Planungs- und Erfahrungswerte ermittelt werden. Hierzu zählen unter anderem die Abgastemperaturen, Abgasvolumenströme und Wasserdampfgehalte im Abgas.

Um eine generelle Einordnung der Ergebnisse zu ermöglichen, wurden die oben genannten Zielgrößen in Abhängigkeit von verschiedenen systematisch abgestuften Einflussgrößen untersucht. Hierzu zählen:

---

<sup>1</sup> Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks (Zentralinnungsverband): Erhebung des Schornsteinfegerhandwerks für 2000 bzw. 2001

- 
- Brennstoffart,
  - Brennstoffwassergehalt,
  - Rücklauftemperatur des für die Kühlung der Abgase verwendeten Kreislaufwassers und
  - Anlagenleistung des Hackschnitzelkessels.

Eine Erprobung des Sekundärwärmetauschers unter einer längeren Holzabgasbelastung mit entsprechenden Feststoffablagerungen und dadurch möglichen Veränderungen im Wärmeübergang der keramischen Wärmetauscherrohre war hier kein Untersuchungsgegenstand. Hierfür sind Langzeituntersuchungen erforderlich.



## 2 Methodisches Vorgehen

Beim Betrieb von Holzfeuerungen treten – anders als bei Feuerungen, die mit homogenen und leicht dosierbaren Brennstoffen wie Heizöl oder Erdgas beschickt werden – stets eine Vielzahl von Einfluss- und Störgrößen auf, die die Aussagekraft und die Verallgemeinerungsfähigkeit von Emissions- und Leistungsmessungen beeinträchtigen. Dazu zählen neben Brennstoffzusammensetzung und -eigenschaften auch dynamische, mehr oder weniger stark schwankende Betriebszustände in der Feuerung, durch die sich die Strömungsverhältnisse in den Mess- und Probenahmestrecken laufend ändern. Messungen an Holzfeuerungen sind daher stets mit einem relativ hohen Maß an Unsicherheit hinsichtlich der Genauigkeit verbunden, mit der die jeweilige Feuerungsart repräsentativ für das gesamte mögliche Einsatzspektrum abgebildet werden kann. Die versuchstechnischen und methodischen Maßnahmen stellen daher notwendigerweise einen Kompromiss zwischen messtechnisch wünschenswertem und wirtschaftlich vertretbarem Aufwand dar. Das gilt nicht nur für die Auswahl der Feuerungsanlage, ihre Betriebszustände und die verwendeten Brennstoffe, sondern auch für die Wiederholbarkeit der Messungen, für Versuchsdurchführung und -aufbau, sowie die messtechnische Ausstattung. Nachfolgend werden der Versuchsplan und die messtechnische Vorgehensweise dargestellt, wobei versucht wurde, die o. g. Unsicherheiten so weit wie möglich zu minimieren.

### 2.1 Versuchsprogramm

Um die im Kapitel 1 dargestellten Ziele zu erreichen, wurde ein Versuchsprogramm erarbeitet, welches die Wirkung möglicher Einflussgrößen (Lastausschöpfung, Rücklauftemperatur am Wärmetauscher, Brennstoffart, Brennstoffwassergehalt, zusätzlich eingesetzte Quenchwassermenge) möglichst umfassend berücksichtigt. Der dazu erarbeitete Versuchsplan ist in Tabelle 1 dargestellt. Insgesamt wurden 17 verschiedene Versuchsvarianten untersucht. Dabei wurden zu jeder Variante mindestens drei Staubmessungen durchgeführt, wobei zeitgleich vor und nach dem Sekundärwärmetauscher gemessen wurde.

Die ursprünglich geplante Anzahl von 51 Versuchen wurde deutlich überschritten, da sich bei den Messungen herausstellte, dass zur Absicherung der Datenbasis weitere Wiederholungen erforderlich waren oder zusätzliche Einstellungen und Teilaspekte betrachtet werden mussten. So wurden einerseits vor Beginn der Messungen am Sekundärwärmetauscher Vorversuche zum Abgleich der Messgeräte durchgeführt und andererseits ergaben sich einige Änderungen bei der Auswahl der Versuchsbrennstoffe (Kapitel 2.2). Schließlich wurden insgesamt 56 Staubemissionsmessungen und 6 Vorversuche durchgeführt.

Die Verbrennungsversuche fanden bei zwei verschiedenen Laststufen (ca. 60 kW und ca. 30 kW) statt. Als Brennstoff kam hauptsächlich Fichtenhackgut mit unterschiedlichen Wassergehalten zum Einsatz. Daneben wurden Getreidestroh- und Miscanthuspellets sowie Triticalekörner und ein Gemisch aus Hobel- und Sägespänen (Schreinereiabfall) verwendet (vgl. Tabelle 2).

Tabelle 1: Versuchsplan

Brennstoff	Wassergehalt	Kesselleistung	Quenchen	Temperatur WT Rücklauf	Anzahl Messungen
Hackgut Fichte	< 40 %	60 kW		20 °C	3
	< 40 %	60 kW		30 °C	3
	< 40 %	35 kW		20 °C	3
	< 40 %	35 kW		30 °C	3
	< 30 %	60 kW		20 °C	3
	< 30 %	60 kW		30 °C	3
	< 30 %	35 kW		20 °C	3
	< 30 %	35 kW		30 °C	3
	< 20 %	60 kW	Keramikdüse	20 °C	3
	< 20 %	60 kW	Zweistoffdüse	30 °C	6
	< 20 %	60 kW		20 °C	3
	< 20 %	60 kW		30 °C	3
Triticalekörner	< 20 %	60 kW		20 °C	5
Miscanthuspellets	< 20 %	60 kW		20 °C	3
Strohpellets	< 20 %	60 kW		20 °C	4
Hobel-/Sägespäne	< 20 %	60 kW		20 °C	5
Summe					56

Zusätzlich wurden für die Rücklauftemperatur am Sekundärwärmetauscher zwei Werte (20 °C und 30 °C) gewählt, und bei zwei Versuchsvarianten wurde Quenchwasser vor dem Sekundärwärmetauscher eingespritzt. Zu jeder Versuchseinstellung wurden zeitgleich je drei Staubprobenahmen über eine Dauer von 30 Minuten vor und nach dem Sekundärwärmetauscher durchgeführt. Bei einigen Versuchen musste die Probenahmedauer auf Grund der hohen Staubbelastung der Filter etwas verkürzt werden. Zudem wurden über die jeweilige Probenahmedauer zeitgleich die Emissionen an CO, CO<sub>2</sub>, C<sub>n</sub>H<sub>m</sub> und NO vor und nach dem Sekundärwärmetauscher ermittelt. Der Wasserdampfgehalt im Rauchgas wurde vor dem Sekundärwärmetauscher vor Beginn und am Ende eines Versuchsdurchlaufes punktuell gemessen und nach dem Wärmetauscher während des Versuchsdurchlaufs kontinuierlich aufgezeichnet. Auch die Betriebsparameter der Feuerungsanlage, der feuerungstechnische Wirkungsgrad, der Kesselwirkungsgrad, der Wirkungsgrad des Sekundärwärmetauschers und die Menge des anfallenden Kondensates wurden registriert. Auf Grund von Störungen während des Versuchsablaufs war bei einzelnen Varianten das komplette Versuchsprogramm nicht an einem Tag durchführbar, so dass gelegentlich eine weitere Messung auf den folgenden Versuchstag verlegt werden musste.

## 2.2 Versuchsbrennstoffe

Um den Einfluss unterschiedlicher Brennstoffeigenschaften auf die Funktionsweise des Sekundärwärmetauschers zu untersuchen, wurde für die Versuche möglichst unterschiedliches Ausgangsmaterial verwendet. Einen Überblick über die verwendeten Brennstoffe gibt Tabelle 2. Das Gemisch aus Hobel- und Sägespänen wurde von einer Schreinerei zur Verfügung gestellt. Bei den Triticalekörnern und bei den Halmgutpellets konnte kein Einfluss auf die Rohstoffbasis genommen werden; sie wurden aus Lagerbeständen des TFZ entnommen. Die Bestimmung des Brennstoffwassergehalts erfolgte im Trockenschrank bei 105 °C nach DIN 51718 [4]. Jede Brennstoffprobe stellt eine im Versuchsablauf aus repräsentativen Teilproben vereinigte Mischprobe dar. Aus dieser Mischprobe wurde jeweils eine Dreifachbestimmung für den Wassergehalt durchgeführt.

Tabelle 2: *Verwendete Versuchsbrennstoffe und deren Wassergehalt*

Brennstoff	Aufbereitungsform	Wassergehalt (%)
Fichte	Hackgut <sup>a</sup>	40 bis 44
	Hackgut <sup>a</sup>	30
	Hackgut <sup>a</sup>	12
	Hobel-/Sägespäne	11
Triticale	Körner	12
Miscanthus	Pellet	11
Getreidestroh	Pellet	11

<sup>a</sup> Fichtenhackgut G30 mit Rinde (gemäß Önorm M 7133 [12])

Analysen zur Bestimmung des Heizwertes und der Elementgehalte C, O, H, N, S wurden hier nicht durchgeführt. Die für die Auswertungen und Emissionsberechnungen erforderlichen Brennstoffdaten wurden aus der NAWARO-Datenbank des Technologie- und Förderzentrums [7] entnommen (Tabelle 3).

Tabelle 3: Heizwert und Elementgehalte der verwendeten Brennstoffe (Datenbankangaben [7])

Brennstoffart	Heizwert $H_u$ [kJ/kg TM]	Elementgehalte, bezogen auf Trockenmasse (TM) [kg/kg TM]				
		C	O	H	S	N
Fichtenholz mit Rinde	18 820	0,4974	0,4325	0,0627	0,0002	0,0013
Hobel-/Sägespäne	18 820	0,4974	0,4325	0,0627	0,0002	0,0013
Weizenstroh	17 200	0,4560	0,4240	0,0580	0,0008	0,0048
Miscanthus	17 600	0,4750	0,4170	0,0620	0,0015	0,0073
Triticale	16 900	0,4350	0,4640	0,0640	0,0011	0,0168

Der Gehalt an kritischen Elementen (Chlor, Schwefel, Schwermetalle) wurde in ausgewählten Proben vom Bayerischen Landesamt für Umweltschutz (LfU) in Augsburg untersucht. Die Ergebnisse sowie entsprechende Vergleichswerte aus der NAWARO-Datenbank [7] sind in Tabelle 4 und Tabelle 5 zusammengefasst. Diese Daten zeigen, dass beim Chlorid keine auffällig überhöhten Konzentrationen vorliegen. Der Schwefelgehalt liegt dagegen bei Stroh leicht über der üblichen Bandbreite der Messwerte. Bei den Schwermetallen fallen lediglich die etwas überhöhten Chrom-, Kupfer- und Nickelgehalte in Triticalekörnern auf. Bei vielen Messdaten konnte allerdings nur der noch relativ hohe Wert der Nachweisgrenze der RFA-Methode angegeben werden, sie sind daher wenig aussagekräftig.

Tabelle 4: Analyse der verwendeten Versuchsbrennstoffe, ohne Miscanthus. Analysendurchführung: Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (LfU) mittels Röntgenfluoreszenzanalyse. Die mit "<" gekennzeichneten Werte stellen die Nachweisgrenze dar.

Parameter	Einheit bez. auf TS	Holzhackgut	Hobelspäne/ Sägespäne	Triticale-Körner	Getreidestroh
<i>Spurenstoffe:</i>					
Cl	mg/kg	< 100	< 100	< 100	2400
S	mg/kg	< 700	< 700	894	1330
<i>Schwermetalle:</i>					
As	mg/kg	< 2	< 2	< 2	< 2
Cd	mg/kg	< 2	< 2	< 2	< 2
Cr	mg/kg	< 7	< 7	7,20	< 7
Cu	mg/kg	3,40	4,10	8,60	4,50
Hg	mg/kg	0,014	0,002	0,002	0,010
Ni	mg/kg	< 3	< 3	4,30	< 3
Pb	mg/kg	< 3	< 3	6,10	< 3
Tl	mg/kg	< 5	< 5	< 5	< 5
Zn	mg/kg	29,5	32,2	44,0	13,5

*Tabelle 5: Vergleichswerte für kritische Inhaltsstoffe nach NAWARO Datenbank [7], Mittelwerte und Bandbreite (in Klammern)*

Parameter	Einheit bez. auf TS	Brennstoff		
		Holz naturbelassen	Triticale-Körner	Getreidestroh
<i>Spurenstoffe:</i>				
Cl	mg/kg	87 (30-183)	692 (362-3013)	2503 (135-5469)
S	mg/kg	234 (100-648)	1067 (62-1366)	737 (103-1295)
<i>Schwermetalle:</i>				
As	mg/kg	0,51 (0,02-1,10)	0,02 (0,02-0,02)	0,04 (0,02-0,48)
Cd	mg/kg	0,26 (0,06-0,40)	0,05 (0,05-0,05)	0,07 (0,05-0,18)
Cr	mg/kg	4,50 (1,41-12,31)	0,32 (0,25-0,85)	4,62 (0,93-49,86)
Cu	mg/kg	3,45 (1,70-8,52)	4,08 (3,13-4,50)	2,21 (1,30-4,49)
Hg	mg/kg	0,05 (0,01-0,12)	0,00 (0,00-0,00)	0,01 (0,00-0,05)
Ni	mg/kg	4,23 (1,27-9,55)	1,03 (0,64-1,38)	0,69 (0,25-2,61)
Pb	mg/kg	2,38 (0,53-5,00)	0,10 (0,10-0,10)	0,37 (0,10-1,82)
Tl	mg/kg	-	-	-
Zn	mg/kg	37,64 (7,7-101,8)	18,41 (16,4-23,3)	9,42 (3,5-19,0)

### 2.3 Versuchsaufbau und Messanordnung

Die Messungen wurden auf dem Feuerungsprüfstand des Technologie- und Förderzentrums (TFZ) an der Dienststelle Freising durchgeführt. Den Versuchsaufbau und die Messstellenanordnung zeigt Abbildung 2.

**Abgasmessstrecken.** Der Gesamtstaubgehalt sowie die Emissionen an CO, CO<sub>2</sub>, C<sub>n</sub>H<sub>m</sub> und NO mussten vor und nach dem Sekundärwärmetauscher zeitgleich erfasst werden. Hierzu bestand der Versuchsaufbau abgasseitig aus einer horizontalen Messstrecke mit einem Übergangsstück zum Anschluss an den Abgasstutzen der Feuerungsanlage, einem Übergangsstück zum Anschluss an die Eintrittsöffnung des Sekundärwärmetauschers sowie einer vertikalen Messstrecke mit einem Übergangsstück zum Anschluss an die Austrittsöffnung des Sekundärwärmetauschers. Der Durchmesser des Abgasstutzens der Feuerungsanlage betrug 250 mm. Mit dem Übergangsstück nach dem Abgasstutzen wurde der Rohrdurchmesser auf 200 mm und mit dem Übergangsstück zum Eintritt in den Sekundärwärmetauscher auf 150 mm reduziert. Das Übergangsstück vom Austritt des Sekundärwärmetauschers in die senkrechte Messstrecke bestand aus einer horizontalen und einer vertikalen 90°-Umlenkung. Der Durchmesser der vertikalen Messstrecke betrug 150 mm. Die Messstellen für die Filterkopfgeräte wurden in der horizontalen und der vertikalen Messstrecke im Abstand von mindestens 3xD (D=Innendurchmesser des Abgasrohres an der Messstelle von der letzten Umlenkung (in Anlehnung an VDI 2066 Blatt 1 [13])) angeordnet.

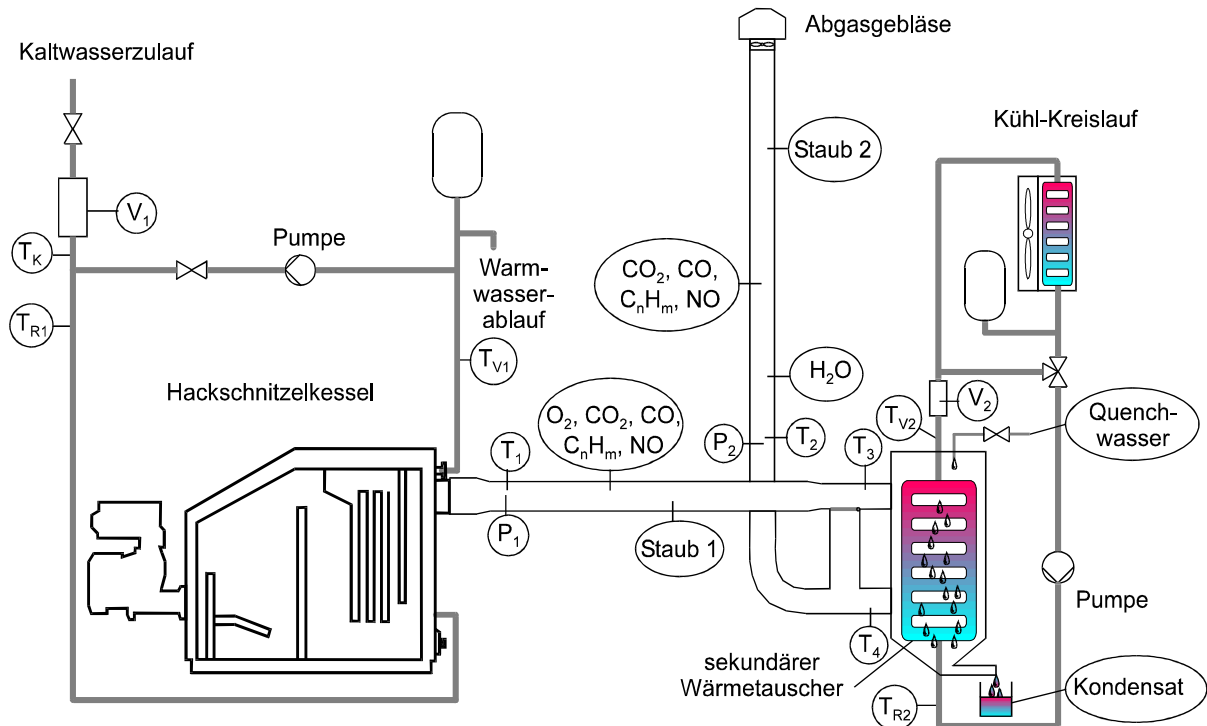


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus und der Messstellenanordnung mit Abgasführung und Wärmeleistungsmessstrecken

Die Geschwindigkeitsmessstellen und die Gasprobenahmesonden wurden in ausreichendem Abstand vor den Staubprobenahmesonden platziert. In beiden Messstrecken waren "DIN-Messstellen" für die Abgastemperatur und den Kaminzug untergebracht. Sie waren in ihrer Lage und Position nach DIN 4702 Teil 2 [5] (Regeln für die heiztechnische Prüfung) angeordnet. Zusätzlich wurde die Abgastemperatur am Eintritt und am Austritt des Sekundärwärmetauschers gemessen. Auf Grund der gewählten Rohrendurchmesser der Messstrecken (200 mm horizontale Messstrecke, 150 mm vertikale Messstrecke) konnte auch bei geringen Abgasmassenströmen die Ermittlung der Gasgeschwindigkeit mit einfacher Differenzdruckmessung erfolgen. Außerdem ermöglichte diese Maßnahme die isokinetische Probenahme gemäß VDI 2066 [13], da die Abgasgeschwindigkeit in einem Bereich lag, der die Verwendung der vorhandenen Düsensätze erlaubte. Nach Durchtritt durch die Messstrecken wurde das Abgas über eine flexible Verbindungsleitung in einen Edelstahlkamin geleitet und über diesen an die Umgebung abgeführt.

**Wärmeleistungsmessstrecken.** Die Hackschnitzelfeuerung wurde wasserseitig an einen speziell hierfür aufgebauten Kühlkreislauf angeschlossen. Dieser ermöglichte die direkte Erfassung der vom Kessel abgegebenen Nutzwärme. Die hydraulische Messstrecke entspricht den Anforderungen der DIN 4702 Teil 2 [5] (vgl. „Kreislauf mit Kurzschlussstrecke“). Sie wird ebenso wie der gesamte Kühlkreislauf bei LAUNHARDT et al. [9] ausführlich beschrieben.

Der Wasserkreis des untersuchten Sekundärwärmetauschers BOMAT AWR 532 wurde über einen Kühler mit Wasser-Luft-Wärmetauscher und elektronischem Dreiwege-Mischventil zur Regelung der Rücklauftemperatur betrieben. Dabei wurden die Temperaturen am Wassereintritt (Rücklauf) und am Wasseraustritt (Vorlauf) sowie der Wasservolumenstrom im Vorlauf des Sekundärwärmetauschers gemessen. Im Datenerfassungsprogramm wurde dann die vom Sekundärwärmetauscher

abgegebene Nutzwärme berechnet. Das Dreiwege-Mischventil diente dabei zum Einstellen der gewünschten Rücklauftemperatur (siehe Abbildung 2).

**Zugeführtes Quenchwasser und Kondensatmenge.** Die Menge des zugeführten Quenchwassers wurde bei den Messungen mit der Keramikdüse über den eingebauten Durchflusszähler in der Zuleitung erfasst. Bei den Versuchen mit der Zweistoffdüse, bei denen das Wasser in der Düse mit Hilfe von Druckluft zerstäubt und durch den entstehenden Unterdruck angesaugt wird, wurde die Wassermenge mit Hilfe eines Messbechers bestimmt. Die Bestimmung der Kondensatmenge erfolgte nach einem vollständigen Versuchsdurchlauf (mindestens drei Wiederholungen) ebenfalls mit Hilfe eines Messbechers.

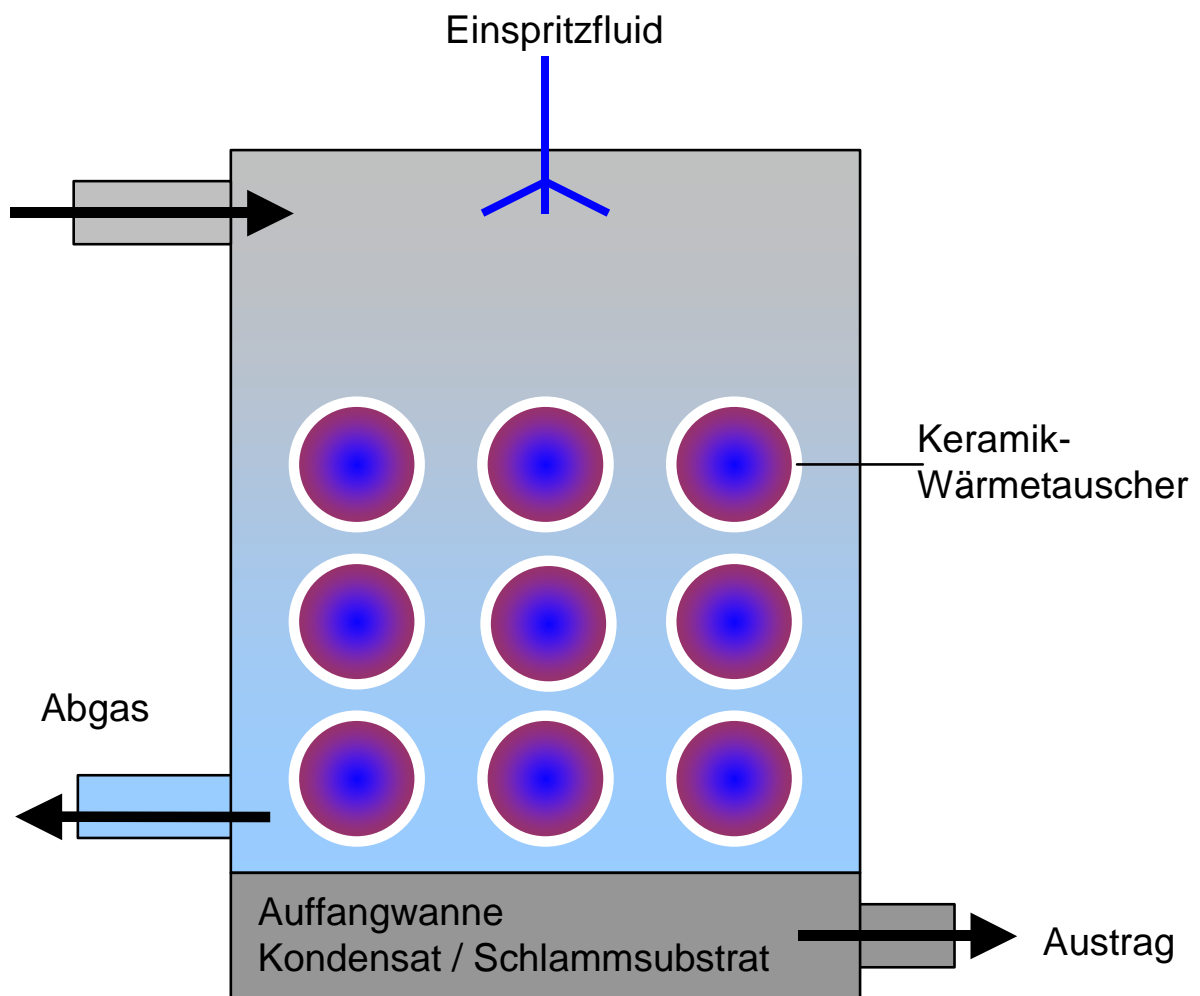


Abbildung 3 Prinzip des getesteten Sekundärwärmetauschers



Abbildung 4: Außen- und Innenansicht des verwendeten Sekundärwärmetauschers

**Sekundärwärmetauscher.** Die Funktionsweise des untersuchten Sekundärwärmetauschers ist in Abbildung 3 dargestellt. Der Abgasstrom wird unmittelbar nach dem Trennkessel in den Wärmetauscher eingeleitet, darin befinden sich mehrere über- und nebeneinander angeordnete, wasserdurchströmte keramische Wärmetauscherelemente (Abbildung 4). Das Abgas gibt hierbei seine Wärme an das Wasser in den Wärmetauscherrohren ab.

Der Vorteil der verwendeten Spezialkeramik ist hierbei, dass die Wärmeleitfähigkeit um etwa den Faktor 5 höher liegt als bei üblicherweise verwendetem Edelstahl. Oberhalb der Keramiken kann zusätzlich Fluid eingespritzt werden. Mit dessen Hilfe kann eine Taupunktniedrigung und möglicherweise eine Abgaswäsche erfolgen. Durch die Fluidtröpfchen sollte ein Großteil der Partikel aus dem Abgasstrom herausgewaschen und die Staubbelastung des Abgases deutlich reduziert werden. Durch das Wasser agglomeriert der Staub des Rauchgases, sinkt im Wärmetauscher zu Boden und kann von dort ausgetragen werden. Die Anordnung der Wärmetauscherrohre übereinander soll ver-



Abbildung 5: Ablagerungen auf der ersten Ebene der Wärmetauscherrohre (Betrieb mit Holzhackschnitzel)

hindern, dass sich Staub auf den Wärmetauscherrohren ablagert bzw. die Räume zwischen den Wärmetauscherrohren verstopfen. Bei den hoch belasteten Biomasseabgasen sind derartige Ablagerungen jedoch nicht vollständig vermeidbar (Abbildung 5). Im Versuchsbetrieb ließen sich diese Ablagerungen jedoch mit Wasser leicht abspülen.

## 2.4 Mess- und Analyseverfahren

Im Rahmen des Messprogramms wurden folgende Anlagenparameter und Emissionsmessgrößen erfasst:

*Luftverunreinigende Stoffe im Abgas vor und nach dem Sekundärwärmetauscher:*

- Kohlenstoffmonoxid (CO)
- flüchtige organische Stoffe (C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>)
- Stickstoffmonoxid (NO)
- Gesamtstaub

*Betriebsparameter der Feuerungsanlage:*

- Sauerstoffgehalt (O<sub>2</sub>)
- Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>)
- Wärmeleistung, Kesselwirkungsgrad und feuerungstechnischer Wirkungsgrad
- Abgastemperaturen, Vor- und Rücklauftemperaturen

*Betriebsparameter des Sekundärwärmetauschers:*

- Anfallende Kondensatmenge
- Zugeführte Menge Quenchwasser
- Wärmeleistung und Wirkungsgrad
- Abgastemperaturen, Vor- und Rücklauftemperaturen

Zusätzlich wurde der Wasserdampfgehalt vor und nach dem Sekundärwärmetauscher erfasst. Die Anordnung der jeweiligen Messgeräte im Abgasstrom zeigt Abbildung 6. Einige Messgrößen wurden kontinuierlich erfasst, andere nur diskontinuierlich.

**Kontinuierlich erfasste Messgrößen.** Die im Versuchsstand kontinuierlich gemessenen Parameter und die hierfür eingesetzte Messgerätetechnik werden in Tabelle 6 zusammengestellt. Die angewandten Messmethoden entsprechen standardisierten Verfahren und sind in den zugehörigen DIN-Normen und VDI-Richtlinien dokumentiert. Alle Messdaten wurden als Analog- bzw. Digitalsignale über das modulare I/O-System FieldPoint von National Instruments erfasst und von einem Personal Computer zur weiteren Verrechnung und Datenspeicherung aufgenommen. Als Messdatenerfassungssoftware wurde das am Technologie- und Förderzentrum entwickelte Programm „Messdatenerfassung V1.02“, programmiert in LabView 6.1, verwendet. Als Zeitintervall zur Mittelwertbildung wurden 60 s gewählt. Die Gasgeschwindigkeit wurde für jedes Intervall aus

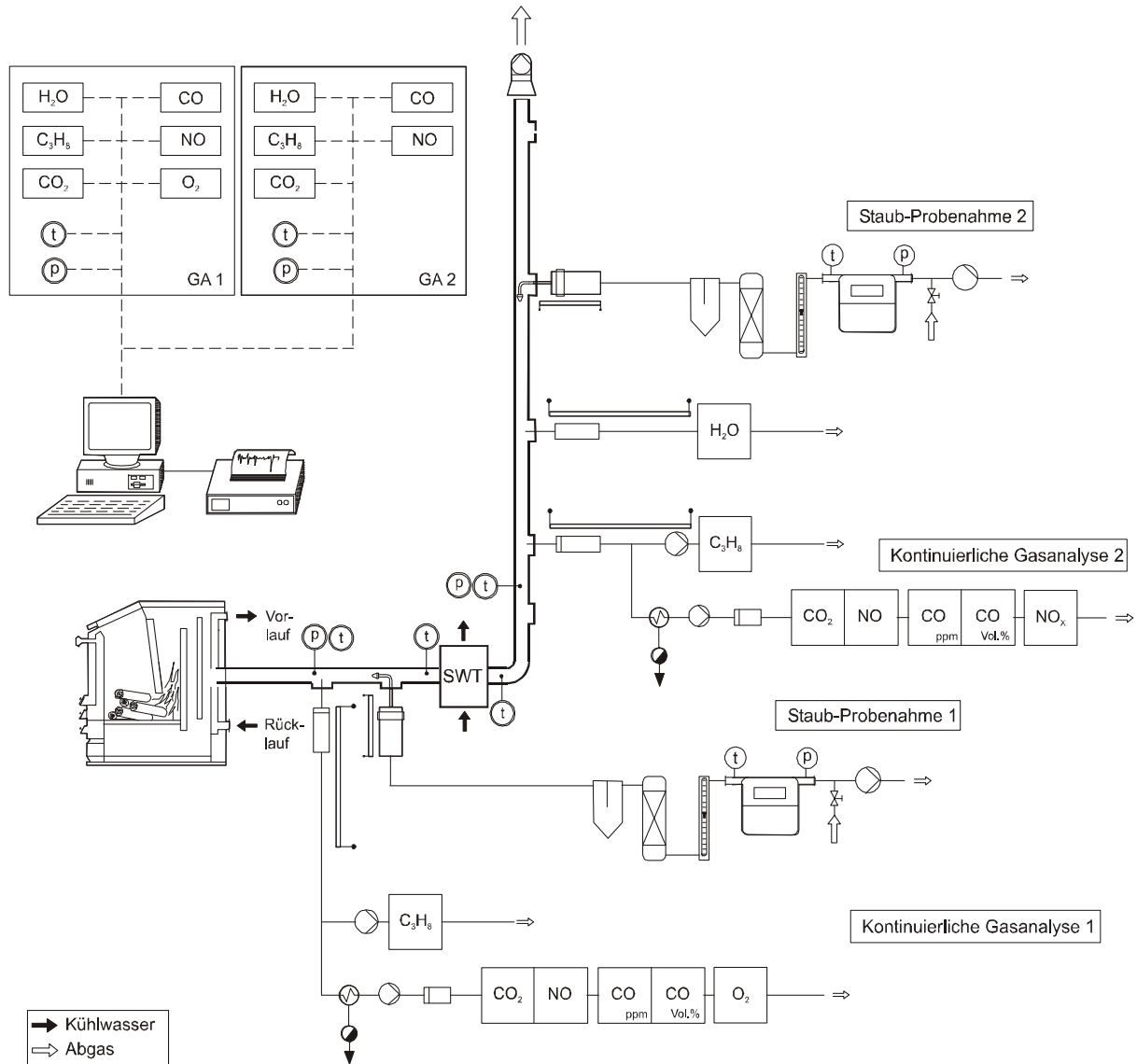


Abbildung 6: Schematische Darstellung des Messgeräteaufbaus auf dem Prüfstand des Technologie- und Förderzentrums

den Minutenmittelwerten der Messgrößen dynamischer Druck, Abgaszusammensetzung und Abgastemperatur berechnet.

**Diskontinuierlich erfasste Messgrößen.** Die Bestimmung der Staubemissionen als Gesamtstaub erfolgte diskontinuierlich mittels anreichernder Abgasprobenahme gemäß VDI 2066 [13]. Die hierfür eingesetzten Messmethoden entsprechen standardisierten Verfahren, die in DIN-Normen und VDI-Richtlinien dokumentiert sind. Der Wasserdampfgehalt im Rauchgas wurde vor dem Sekundärwärmetauscher vor Beginn und am Ende eines Versuchsdurchlaufes punktuell gemessen und nach dem Wärmetauscher während des Versuchsdurchlaufes kontinuierlich aufgezeichnet.

Tabelle 6: Kontinuierlich erfasste Messgrößen – Technische Daten der Messgeräte

Messgröße	Messgerät/Hersteller	Messprinzip/-verfahren	aktiver Messbereich	Prüfgaskonzentration <sup>1)</sup>
Temperatur	Thermoelement (Typ K), Fa. Philips-Thermocoax	Thermoelektrizität	0-1000 °C	---
statischer Druck	Präzisions-Mikromanometer, Fa. Müller	Differenzdruck	0-200 Pa	---
dynamischer Druck	Staurohr mit Präzisions-Mikromanometer, Fa. Müller	Differenzdruck	0-200 Pa	---
Luftdruck <sup>2)</sup>	Barograph, Fa. Lambrecht	Anaeroiddose	900-1000 hPa	---
<i>Abgasbestandteile</i>				
O <sub>2</sub>	OXYNOS 100, Fa. Fisher-Rosemount	Paramagnetismus	0-21 %	20,9 % Luft-O <sub>2</sub>
CO <sub>2</sub>	BINOS 1004, Fa. Fisher-Rosemount	Infrarotabsorption	0-20 %	15,0 % in N <sub>2</sub>
	BINOS 1, Fa. Fisher-Rosemount	Infrarotabsorption	0-20 %	15,0 % in N <sub>2</sub>
H <sub>2</sub> O	Hygrophil 4220 B, Fa. Ultrakust	Psychrometrie	10-500 g/kg	---
CO	BINOS 1001, Fa. Fisher-Rosemount	Infrarotabsorption	0-100	446 ppm
			0-500	in N <sub>2</sub>
	BINOS 1001, Fa. Fisher-Rosemount	Infrarotabsorption	0-2500	
			0-5000 ppm <sup>3)</sup>	2,53 % in N <sub>2</sub>
C <sub>n</sub> H <sub>m</sub> <sup>5)</sup>	BINOS 100, Fa. Fisher-Rosemount	Infrarotabsorption	0-500 ppm	446 ppm in N <sub>2</sub>
			0-2,5 %	2,53 % in N <sub>2</sub>
	Modell VE 7, Fa. J.U.M.	Flammenionisation	0-10	90,9 ppm C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>
			0-100	in N <sub>2</sub>
NO	FID 3-100, Fa. J.U.M.	Flammenionisation	0-10	90,9 ppm C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>
			0-100	in N <sub>2</sub>
	BINOS 1004, Fa. Fisher-Rosemount	Infrarotabsorption	0-1000	
			0-100000ppm <sup>4)</sup>	238 ppm NO in N <sub>2</sub>
NO/NO <sub>x</sub> <sup>6)</sup>	Modell 951 A, Fa. Beckmann Industrial	Chemolumineszenz	0-250 ppm	238 ppm NO in N <sub>2</sub>
<i>Wärmeleistung und Wirkungsgrad</i>				
Temperatur <sup>7)</sup>	Widerstandsthermometer (PT100), Fa. Heraeus	temperaturabhängige Widerstandsänderung	(-)50-150 °C	---
Kühlwasserstrom	Promag 53 H, Promag 53 P, Fa. Endress+Hauser	Magnetisch-induktives Durchfluss-Messsystem	100-1800 l/h <sup>8)</sup>	---
			400-6300 l/h <sup>8)</sup>	---

Hinweise: Bestimmung von C<sub>n</sub>H<sub>m</sub> und H<sub>2</sub>O im feuchten Abgas bei vorgeschaltetem beheiztem Keramikfilter (Betriebstemperatur: 180 °C, Porengröße: ca. 0,9 µm) und beheizter Messgasleitung (Betriebstemperatur: 180 °C, Länge 5 m); Bestimmung von O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, NO, NO<sub>x</sub> im trockenen Abgas nach Messgaskühler (Gasausgangstaupunkt: 5 °C) und PartikelfeinfILTER (Porengröße: 0,9 µm und 0,2 µm)

- 1) relative Genauigkeit des Prüfgases: ± 2 % (lt. Herstellerangabe)
- 2) Ablesung einmal am Tag
- 3) automatische Messbereichsumschaltung
- 4) manuelle Messbereichsumschaltung
- 5) Summe der flüchtigen organischen Verbindungen; Messung im heißen Abgas (Θ = 180 °C) gemäß VDI-Richtlinie 3481 Blatt 1 [15], Ergebnisse bezogen auf trockenes Abgas
- 6) NO<sub>x</sub> = NO + NO<sub>2</sub>
- 7) Vor- und Rücklaufwassertemperatur (zwei Messstellen), Kühlwassertemperatur, Raum- und Außentemperatur (je eine Messstelle)
- 8) relative Genauigkeit: ± 0,2 % (lt. Herstellerangabe)

Die Menge des zugeführten Quenchwassers wurde bei den Messungen mit der Keramikdüse über den eingebauten Durchflusszähler in der Zuleitung erfasst. Bei den Versuchen mit der Zweistoffdüse, bei denen das Wasser in der Düse mit Hilfe von Druckluft zerstäubt und durch den entstehenden Unterdruck angesaugt wird, wurde die Wassermenge mit Hilfe eines Messbechers bestimmt.

Als Brennstoffparameter wurde der Wassergehalt bestimmt. Ergebnisse hierzu sind im Kapitel 2.2 aufgeführt.

Die Bestimmung der Gesamtstaubemissionen erfolgte nach dem in den VDI-Richtlinien 2066 Blatt 1 [13] und Blatt 3 [14] beschriebenen Messverfahren (Methode mit "Filterkopfgerät"). Bei dieser Probenahme wird ein staubbeladener Teilgasstrom unter isokinetischen Bedingungen entnommen und einem Rückhaltesystem zur Staubabscheidung zugeführt. Als Abscheidemedium wurde ein Quarzfaserfilter (Retention 99,998 % gemäß DOP(0,3 $\mu$ m)) in einer Filterhülse im Rückhaltesystem eingesetzt, der außerhalb des Abgaskanals angeordnet war. Je nach Erfordernis wurde das Absaugrohr und das Rückhaltesystem beheizt um eine Unterschreitung des Abgastauptunktes zu vermeiden. Nach der Quarzfaserhülse gelangt das Messgas in die Absaugapparatur. Diese besteht aus einer Einheit zur Gastrocknung, den Geräten zur Ermittlung des Volumenstromes sowie des Gaszustandes und einer Saugpumpe. Eine optische Durchflussanzeige dient zusätzlich der Kontrolle zwischen dem einzustellenden Soll- und Istwert.

Die Dauer einer Gesamtstaubprobenahme erfolgte in der Regel über einen Zeitraum von 30 Minuten. Bei sehr hohen Staubbelastungen oder sehr feinen Stäuben wurde der Probenahmezeitraum abhängig vom sich einstellenden Unterdruck an der Filterhülse auf 20 bzw. 15 Minuten verkürzt. Es wurden immer zwei Staubfilterhülsen parallel (eine vor und eine nach dem Sekundärwärmetauscher) beprobt. Die Beladung der Hülsen lag dabei zwischen 10 und 150 mg. Der Probengasdurchsatz lag in einem Bereich von 0,5 bis 1 Nm<sup>3</sup>/h. Die Bestimmung der Staubmasse erfolgte gravimetrisch mit einer elektronischen Präzisionswaage (Fa. Mettler, Auflösung: 0,1 mg) durch Einwiegen der unbeladenen und Rückwiegen der beladenen Messfilter gemäß VDI-Richtlinie 2066 Teil 1 [13]. Die Wägung sowie die Konditionierung der Filter wurde im Labor des Technologie- und Förderzentrums durchgeführt.

## **2.5 Versuchsdurchführung und Auswertung**

Die Hackgutfeuerung wurde auf dem Prüfstand des Technologie- und Förderzentrums aufgebaut und im Beisein eines Monteurs des Feuerungsherstellers in Betrieb genommen. Anschließend wurden Vorversuche mit den Prüfbrennstoffen durchgeführt, um mit der Bedienung der Anlage vertraut zu werden. Während der Vorversuche wurde außerdem der zu erwartende Gesamtstaubgehalt bestimmt und ein Messgeräteabgleich durchgeführt. Die Anlage wurde vor jedem Versuch auf den Versuchsbrennstoff und die gewählte Laststufe eingestellt. Dabei wurde als Optimierungsgröße im Rahmen der technischen Möglichkeiten ein minimaler CO-Gehalt bei größtmöglichem CO<sub>2</sub>-Gehalt im Abgas angestrebt. Die Einstellung der Hackgut-Feuerungsanlage erfolgte im wesentlichen durch Anpassung der Takt- und Pausenzeit der Zufuhrschnecke, der Primär- und Sekundärluftmenge sowie der Feuerraumtemperatur an die erforderliche Wärmeleistung.

Die Verbrennungsversuche wurden nach Abschluss der Vorbereitungen über den Zeitraum von Ende November 2003 bis Anfang Februar 2004 durchgeführt. Die Durchführung wird nachfolgend beschrieben.

**Anheizen und Beharrungszustand.** Nach dem Befüllen des Tagesvorratsbehälters mit dem Versuchsbrennstoff wurde die Feuerungsanlage eingeschaltet und damit das Zündprogramm der elektronischen Verbrennungsregelung gestartet. Bei den Versuchsbrennstoffen mit sehr hohem Brennstoffwassergehalt ( $w > 40\%$ ) musste der Feuerraum zunächst mit trockenem Brennstoff gefüllt werden, um ein automatisches Zünden zu ermöglichen.

In der Phase des Anheizens erfolgte lediglich eine Zirkulation des Heizwassers im Kühlkreislauf. Die Kaltwassereinspeisung setzte erst ab einer Kesselwassertemperatur von ca.  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  ein. Dabei wurde der Kaltwasserdurchfluss auf die im Beharrungszustand erforderliche Wärmeleistung eingeregelt. Die Vorlauftemperatur lag gemäß DIN EN 303-5 [6] im Mittelwert zwischen  $70$  und  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ , und die Temperaturdifferenz zwischen Vorlauf und Rücklauf betrug  $10$  bis  $25$  Kelvin.

Der Beharrungszustand war erreicht, nachdem die Betriebs- und Abgasparameter einen annähernd gleichmäßigen Verlauf zeigten. Bei den durchgeführten Verbrennungsversuchen lag diese Dauer je nach Versuchsbrennstoff bei bis zu vier Stunden. Über die Dauer der Probenahme wurden alle automatischen Reinigungsmechanismen der Feuerungsanlage (Rostbewegung, Ascheaustragung) abgeschaltet.

**Durchführung der Messungen.** Die Messwertaufzeichnung wurde unmittelbar nach dem Zünden des Brennstoffes gestartet und es erfolgte das Kalibrieren der Gasanalytoren. Nach dem Einstellen des Beharrungszustandes wurde zunächst der Wasserdampfgehalt im Abgas im Bypassbetrieb des Sekundärwärmetauschers bestimmt. Dann wurde der Kondensatauffangbehälter geleert, der Sekundärwärmetauscher durch Schließen des Bypass zugeschaltet und das Kühlsystem für den Sekundärwärmetauscher auf die gewünschte Rücklauftemperatur eingeregelt. Falls erforderlich, wurde noch der Vorratsbehälter für das Quenchwasser gefüllt, bzw. der Wasserzähler an der Zuleitung zur Düse im Sekundärwärmetauscher abgelesen.

Danach wurden die Absaugraten für die beiden Staubprobenahmen bestimmt und die Gesamtstaubmessungen über eine Dauer von  $30$  Minuten gestartet. Zu jeder Versuchsvariante erfolgten zwei weitere Messungen, insgesamt also drei Wiederholungsmessungen, über die gleiche Dauer und unter weitgehend gleichen Betriebsbedingungen.

Um eine messbare Belegung der Filterhülsen sicherzustellen, wurde versucht, die Gesamtstaubprobenahme über die Dauer von  $30$  Minuten aufrecht zu erhalten. Bei einigen Brennstoffen zeigte sich jedoch ein deutlicher Druckanstieg über der Filterhülse, der das Erreichen der Beladungsgrenze ankündigte. In solchen Fällen wurde die Staubbmessung schon nach  $20$  bzw.  $15$  Minuten beendet.

**Laststufenabsenkung.** Als Heizlaststufen für die Hackgutfeuerung wurden  $60\%$  ( $60\text{ kW}$ ) und  $30\%$  der Nennwärmeleistung ( $30\text{ kW}$ ) gewählt, letztere war entsprechend den Herstellerangaben die kleinste mögliche Wärmeleistung. Die tatsächlich erreichten Laststufen können versuchsbedingt leicht über oder unter den Zielwerten liegen; entsprechend werden die Mittelwerte der tatsächlich erreichten Heizlaststufen im Anhang zusammengestellt. Eine Leistungsstufe wurde zu

Beginn eines Versuchstages dem Versuchsplan entsprechend fest eingestellt. Eine Variation der Leistungsstufen innerhalb eines Messtages erfolgte nicht.

Die Leistung des Sekundärwärmetauschers wurde durch Variation der Rücklaufemperatur verändert. Dazu wurde zunächst eine der möglichen Rücklaufemperaturen (20 °C oder 30 °C) am Kühlkreislauf des Sekundärwärmetauschers eingeregelt. Nach Durchführung der Staubmessungen inklusive aller Wiederholungen wurde die Rücklaufemperatur auf den zweiten möglichen Wert eingeregelt und es wurden erneut die Staubmessungen gestartet. In der Regel erfolgte die Variation der Rücklaufemperaturen am Sekundärwärmetauscher an einem Versuchstag bei konstanten Betriebsbedingungen der Hackgutfeuerung. Nur wenn das Erreichen des Beharrungszustandes zulange dauerte und eine zweite Messreihe an einem Versuchstag nicht mehr möglich war, wurden die Messungen mit der jeweils anderen Rücklaufemperatur auf einen anderen Messtag verschoben.

**Abschalten und Beenden.** Nach Abschluss der letzten Probenahme wurde der Sekundärwärmetauscher wieder in den Bypassbetrieb geschaltet, noch mal der Wasserdampfgehalt im Abgas gemessen und die Menge des angefallenen Kondensates mit dem Messbecher bestimmt. Dann wurde die Messwertaufzeichnung beendet und die Feuerungsanlage ausgeschaltet. Die Feuerungsanlage wurde über das Kühlsystem nachgekühlt, um ein nachträgliches Überhitzen zu verhindern. Insgesamt betrug die Betriebszeit der Feuerungsanlage während eines Verbrennungsversuches bzw. Versuchstages zwischen 8 und 11 Stunden.

**Wassergehaltsänderung.** Bei den Versuchen zur Untersuchung des Wassergehaltseinflusses auf die Hackschnitzelfeuerung und den Sekundärwärmetauscher war eine Anpassung der Einstellungen an die unterschiedlichen Wassergehalte erforderlich. Die für trockenes Fichtenhackgut ( $w = 11\%$ ) gefundene Einstellung des Brennstoffmassenstromes musste auf Grund des geringeren Heizwertes bei feuchtem Hackgut ( $w > 40\%$ ) erhöht werden. Zudem musste eine entsprechende Veränderung der Primär- und Sekundärluftmenge sowie der Feuerraumtemperatur vorgenommen werden. Im Vordergrund stand dabei eine möglichst konstante Betriebsweise im Beharrungszustand und weniger eine Optimierung der CO-Emissionen, obwohl diese auch bei hohem Wassergehalt im Brennstoff nur selten über den geltenden Emissionsgrenzwert anstiegen.

### 3 Ergebnisse

Nachfolgend werden die wichtigsten Ergebnisse der Untersuchung zusammengefasst und grafisch dargestellt. Eine vollständige Übersicht über die gewählten Betriebseinstellungen sowie die Einzelmessergebnisse (Mittelwerte aus jeweils mindestens 3 Wiederholungsmessungen) finden sich im Datenanhang.

#### 3.1 Wirkungsgrad- und Leistungssteigerung

Der Einsatz des Sekundärwärmetausches führte in der Regel zu einem Anstieg des Systemwirkungsgrades in Höhe von ca. 13 bis 20 Prozentpunkten. Das bedeutet, dass die Brennstoffausnutzung, die bei einem konventionellen Hackschnitzelkessel üblicherweise bei 85 bis 90 % liegt, durch den Zusatzwärmetauscher auf über 100 % erhöht werden kann, sofern eine Nutzung der anfallenden Niedertemperaturwärme stattfinden kann. Dieser Wärmegewinn stammt zu einem relativ konstanten Anteil aus der zusätzlichen Abgaskühlung (sensible Wärme), während die zusätzlich nutzbare Wärme aus der Rauchgaskondensation (latente Wärme) in Abhängigkeit des Brennstoffwassergehalts schwankt. Das geht aus Abbildung 7 hervor.

**Wassergehalts- und Rücklauftemperatureinfluss.** Bei einem Wassergehalt von nur 10 % trägt die Kondensationswärme nur mit ca. 4 bzw. 2 Prozentpunkten zur Wirkungsgradsteigerung bei, während ein 40-%iger Wassergehalt hier schon mit ca. 9 bis 10 Prozentpunkten zu Buche schlägt.

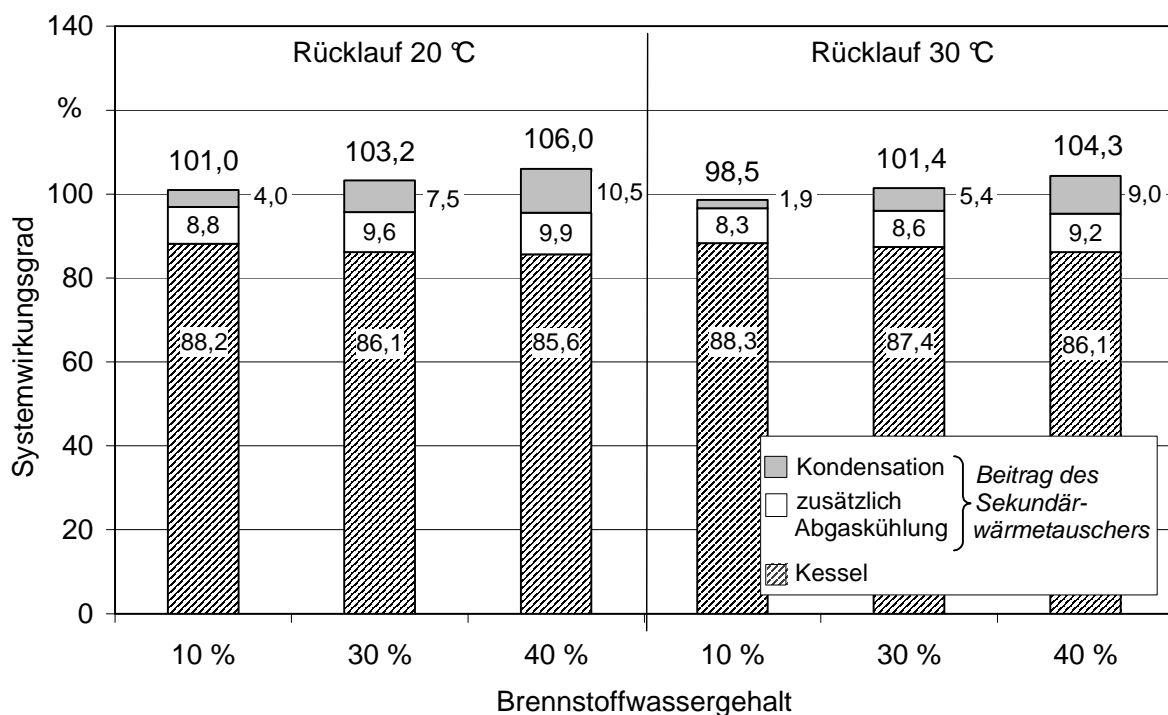


Abbildung 7: Systemwirkungsgrad des Hackschnitzelkessels mit Sekundärwärmetauscher bei verschiedenen Rücklauftemperaturen und Brennstoffwassergehalten. Alle Messungen wurden bei ca. 60 kW Heizleistung durchgeführt. Mittelwertdarstellung für jeweils drei Wiederholungsmessungen.

Dabei führt die Absenkung des Rücklauf temperaturniveaus von 30 auf 20 °C zu einer Verbesserung in Höhe von 1,7 bis 2,5 Prozentpunkten (Abbildung 7). Dabei wird durch Senkung der Rücklauf temperatur sowohl der Beitrag aus sensibler Wärme als auch der Beitrag aus latenter Wärme erhöht. Wird lediglich der zusätzliche Kondensationswärmeanteil betrachtet, so liegt die Verbesserung bei 1,5 bis 2,1 Prozentpunkten.

**Brennstoffarteneinfluss.** Zwischen den fünf untersuchten Brennstoffarten wurden eher geringe Unterschiede beim zusätzlichen Wärmegewinn durch den Sekundärwärmetauscher festgestellt. Eine Ausnahme bildet hierbei lediglich das Getreide (Triticalekörner), welches mit einem Kesselwirkungsgrad von nur 77 % verbrannt wurde (Abbildung 8). Derartige Wirkungsgradeinbußen wurden bereits in früheren Versuchen beobachtet, in denen – wie im vorliegenden Fall – Getreidekörner in nicht speziell hierfür entwickelten Feuerungen verwendet wurden [8]. Die erhöhten Kesselverluste gingen mit einer erhöhten Abgastemperatur einher und konnten in der hier gewählten Anlagenauslegung durch die Verwendung des Sekundärwärmetauschers nicht kompensiert werden.

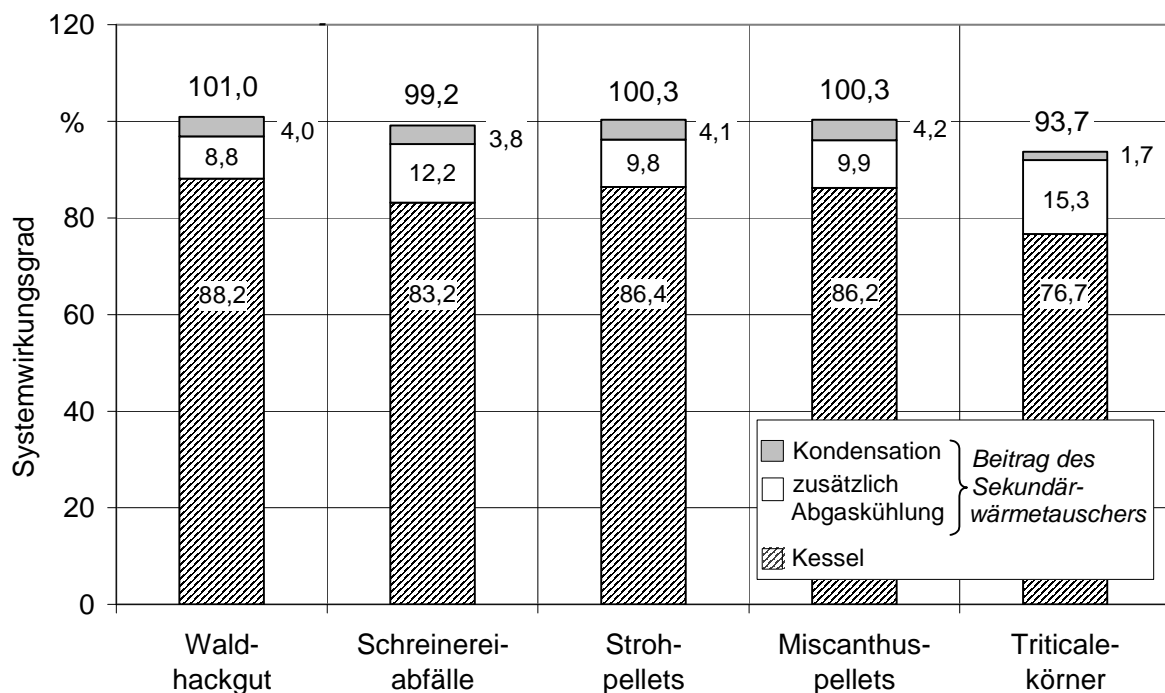


Abbildung 8: Systemwirkungsgrad des Hackschnitzelkessels mit Sekundärwärmetauscher bei verschiedenen Brennstoffen. Alle Messungen wurden bei ca. 10 % Brennstoffwassergehalt, ca. 60 kW Heizleistung und 20 °C Rücklauf temperatur durchgeführt. Mittelwertdarstellung für jeweils drei Wiederholungsmessungen.

**Einfluss der Heizleistung.** Der Wirkungsgrad wird auch durch die vorliegende Heizlast der Feuerung beeinflusst. In den Versuchen zeigte sich eine Wirkungsgradverbesserung bei verminderter Last. Diese Verbesserung betrug bei der Heizlaststufe von ca. 30 kW im Vergleich zu 60 kW zwischen 0,6 und 5,8 Prozentpunkte; sie war besonders ausgeprägt bei den höheren Brennstoffwassergehalten (Abbildung 9).

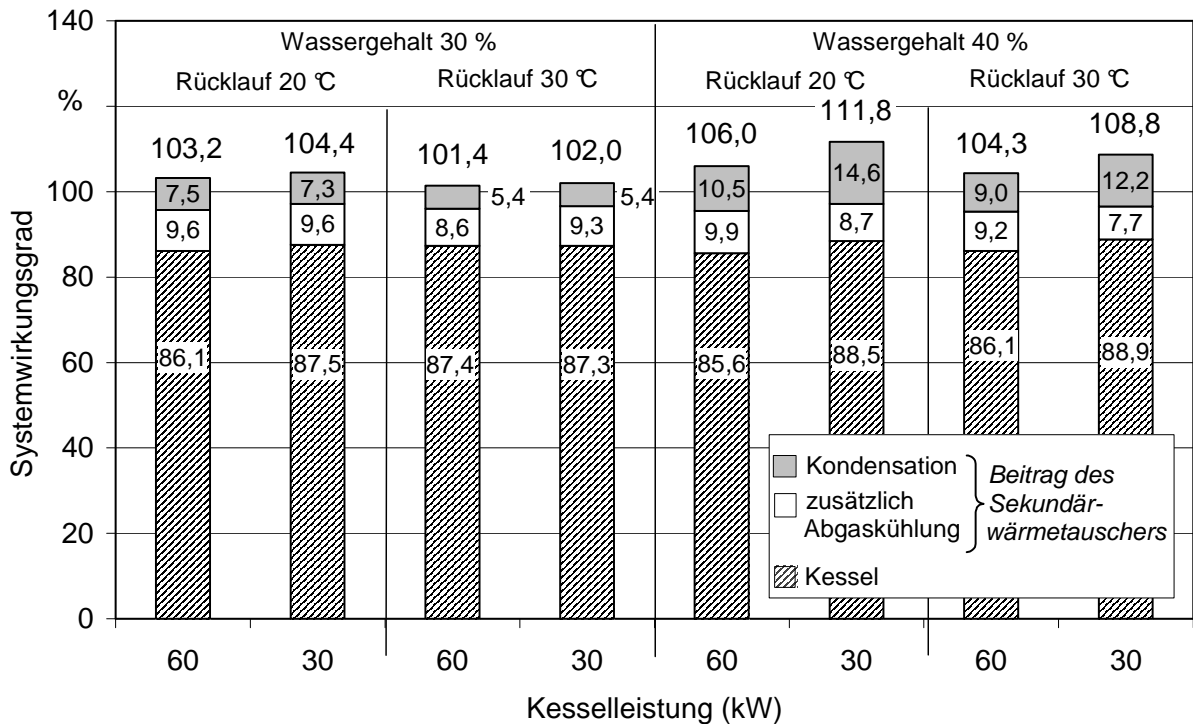


Abbildung 9: Systemwirkungsgrad des Hackschnitzelkessels mit Sekundärwärmetauscher bei verschiedenen Heizlasten und Rücklauftemperaturen. Mittelwertdarstellung für jeweils drei Wiederholungsmessungen.

**Energieverluste.** Bei den eingesetzten Holzhackschnitzeln betrug die mit dem Abgas nach dem Sekundärwärmetauscher ungenutzt an die Atmosphäre als restliche fühlbare Wärme abgegebene Energie zwischen 3,1 und 4,7 % der zugeführten Brennstoffenergie. Weitere Wirkungsgradverbesserungen müssten demnach aus dieser relativ geringen verbleibenden Restenergie gewonnen werden, oder sie stammen aus der weiteren Kondensation bzw. aus der Verminderung der Abstrahlung.

Ein typisches Flussdiagramm für den Einsatz der hier untersuchten Brennwerttechnik an einer häuslichen Holzhackschnitzelfeuerung zeigt Abbildung 10.

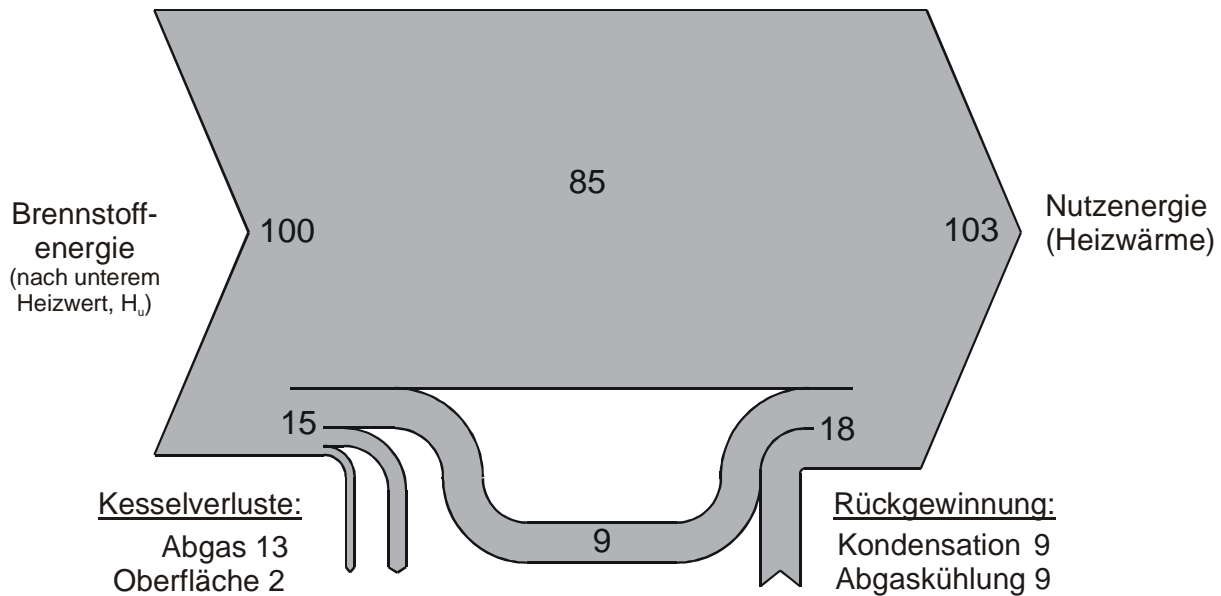


Abbildung 10: Schematische Darstellung des Energieflusses einer Brennwertfeuerung für Holz; brennstoffe angegeben in Prozentpunkten bezogen auf die zugeführte Brennstoffenergie

**Abgastemperatur.** Die beschriebene Steigerung des Wirkungsgrades ist ein Ergebnis der forcierten Abgaskühlung. Im Durchschnitt über alle Versuche mit Holzhackschnitzeln (ohne Quenchen) kam es zu einer Absenkung der Abgastemperatur um  $114\text{ °C}$ . Nach dem Sekundärwärmetauscher lag die mittlere Abgastemperatur noch bei  $65\text{ °C}$  (zwischen  $59$  und  $84\text{ °C}$ ). Bei den drei verwendeten Halmgutbrennstoffen war die mittlere Abgastemperatur nach dem Sekundärwärmetauscher mit  $89\text{ °C}$  deutlich höher, das gilt auch für die Temperaturabsenkung, die im Mittel  $150\text{ °C}$  betrug. Die Daten zu den einzelnen Versuchen (Mittelwerte) sind im Anhang zusammengestellt.

Dass die Abgastemperaturen nach dem Sekundärwärmetauscher oberhalb der Taupunkttemperatur liegen, obwohl im Sekundärwärmetauscher eine Kondensation erfolgte, ist durch die vor allem lokal stattfindende verstärkte Abkühlung der Rauchgase zu erklären. Die Abgase werden nicht über den gesamten Querschnitt des Abgasstromes sondern lediglich in Strähnen entlang der Oberfläche der Wärmetauscherrohre unter die Taupunkttemperatur abgekühlt, so dass nur in diesen Strähnen eine Kondensation erfolgt. Das nach dem Wärmetauscher wieder gemischte Rauchgas kann somit noch einen gewissen Restwassergehalt und eine Temperatur oberhalb der Taupunkttemperatur aufweisen.

**Leistungssteigerung.** Mit den beobachteten Wirkungsgradsteigerungen geht auch eine proportionale Steigerung der Anlagenleistung einher. Die Daten für die tatsächlich eingetretene Leistungssteigerung lassen sich aus der Messwertezusammenstellung im Anhang ablesen. Ein Beispiel für die nominell erzielte Leistungserhöhung zeigt Abbildung 11.

Im Durchschnitt über alle Versuche (außer Quenchbetrieb) lag die erzielte gemessene Steigerung der abgegebenen Wärmeleistung bei  $18\%$  (zwischen  $12$  und  $26\%$ ).

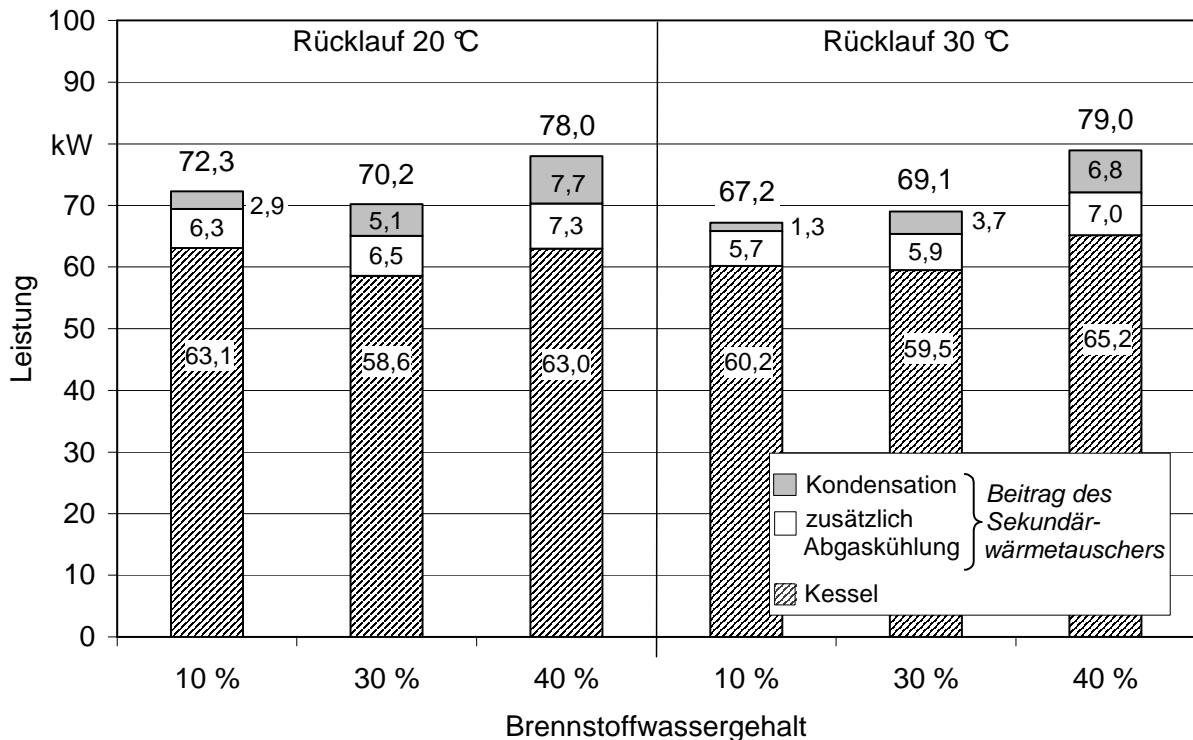


Abbildung 11: Leistungssteigerung eines Holzhackschnitzelkessels durch Verwendung eines Sekundärwärmetauschers bei verschiedenen Rücklauf-temperaturen und Brennstoffwassergehalten. Mittelwertdarstellung für jeweils drei Wiederholungsmessungen.

### 3.2 Wirkungen auf den Staubausstoß

Durchgehend für alle Versuche lässt sich eine signifikante Verminderung der Staubemissionen durch den Einsatz des Sekundärwärmetauschers (SWT) mit Kondensationswirkung feststellen. Bei Holzhackschnitzeln fiel der Staubausstoß von einem Niveau zwischen 28 und 47 mg/Nm<sup>3</sup> (vor dem SWT) auf ca. 21 bis 29 mg/Nm<sup>3</sup> (nach dem SWT). Diese Minderung liegt somit bei Holzhackschnitzeln in einer Größenordnung zwischen 20 und 37 % (Abbildung 12).

**Wassergehaltseinfluss.** Die Staubemission der Hackschnitzelfeuerung wird durch einen steigenden Wassergehalt tendenziell positiv beeinflusst. Das gilt auch, wenn kein sekundärer Wärmetauscher mit Kondensationsbetrieb verwendet wird (Abbildung 12) und wird auch durch vergleichbare Messungen an der ausgewählten Hackschnitzelfeuerung bestätigt [11]. Bei Verwendung des Sekundärwärmetauschers bleibt dieser Trend erhalten, er wird jedoch nicht verstärkt. Das heißt, dass es durch den vermehrten Kondensatanfall nicht – wie ursprünglich angenommen – zu einer wirksameren Staubabscheidung kommt. Dies zeigt sich bei den Staubabscheidegraden in Abbildung 12, an denen kein positiver Trend ablesbar ist. Allerdings ist das Gesamtniveau beim Staubausstoß in den dargestellten Versuchen mit Hackschnitzeln relativ niedrig, so dass verallgemeinernde Aussagen wegen des erhöhten relativen Mess- und Probenahmefehlers für Staub schwierig sind.

**Einfluss des Rücklauf temperaturniveaus.** Durch Absenkung des Rücklauf temperaturniveaus von 30 auf 20 °C kam es tendenziell zu einem verbesserten Staubabscheidegrad in Höhe von 4 bis 14 Prozentpunkten bei 60 kW Heizleistung (Abbildung 12). Über die Summe aller Versuche lag diese Verbesserung bei durchschnittlich 8 Prozentpunkten. In wie weit hierfür der erhöhte Kondensatanfall (vgl. Kapitel 3.4) als Ursache gelten kann, ist nicht festzustellen.

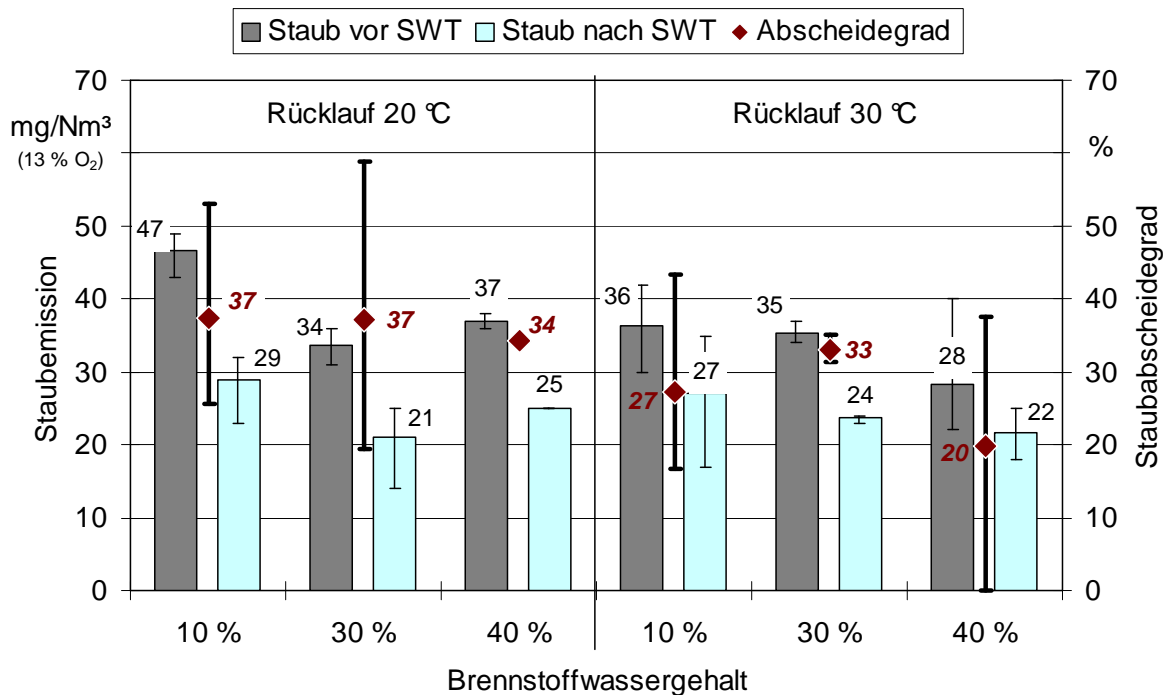


Abbildung 12: Staub-Emissionsminderung durch Einsatz des Sekundärwärmetauschers mit Kondensationsbetrieb bei verschiedenen Brennstoffwassergehalten und verschiedenen Rücklauf temperaturen. Alle Messungen wurden bei ca. 60 kW Heizleistung durchgeführt. Mittelwertdarstellung für jeweils drei Wiederholungsmessungen.

**Brennstoffarteneinfluss.** Zwischen den fünf untersuchten Brennstoffarten wurden – wie erwartet – deutliche Unterschiede beim Gesamtstaubausstoß festgestellt. Bei den drei Halmgutbrennstoffen (Getreidestroh- und Miscanthuspellets sowie Triticalekörner) waren die Staubmesswerte deutlich erhöht, wobei der Emissionsgrenzwert von 150 mg/Nm<sup>3</sup> der 1. BImSchV nur mit Miscanthuspellets unterschritten werden konnte. Allerdings handelte es sich bei der verwendeten Anlage um eine reine Hackschnitzelfeuerung, die vom Hersteller nicht für die Verwendung von Halmgutbrennstoffen freigegeben worden war. Diese Messungen sollten daher lediglich die ungünstigen Brennstoffeigenschaften von Halmgut für die Erzeugung hoher Staubfrachten in den Versuchen nutzen.

Bei derartig hohen Staubfrachten im Abgas lag der Staubabscheidegrad des Sekundärwärmetauschers geringer als bei den beiden untersuchten Holzbrennstoffen, wobei hier lediglich die Versuche mit einheitlich ca. 10 % Wassergehalt und 20 °C Rücklufttemperatur verglichen werden können (Abbildung 13). In absoluten Werten können die Staubemissionen allerdings auch deutlich

vermindert sein; das zeigt sich am Beispiel von Triticalebrennstoff, bei dem nach dem Sekundärwärmetauscher eine um ca. 100 mg/Nm<sup>3</sup> verminderte Staubemission gemessen wurde. Allerdings lässt sich eine derartige hohe Staubabscheidung bei den übrigen Halmgutbrennstoffen nicht ohne weiteres reproduzieren.

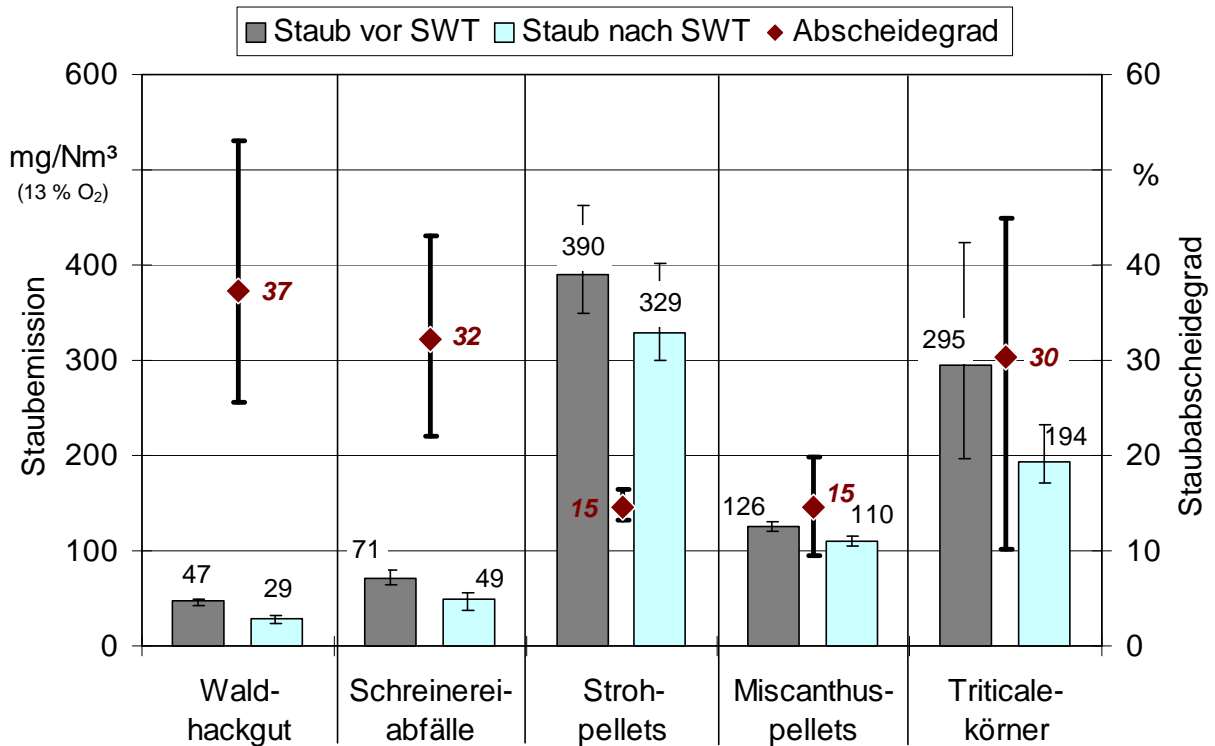


Abbildung 13: Staub-Emissionsminderung durch Einsatz des Sekundärwärmetauschers mit Kondensationsbetrieb bei verschiedenen Versuchs-brennstoffen. Alle Messungen wurden bei ca. 10 % Brennstoffwassergehalt, ca. 60 kW Heizleistung und 20 °C Rücklauf-temperatur durchgeführt. Mittelwertdarstellung für jeweils drei Wiederholungsmessungen

Die Stäube aus der Verbrennung von Halmgutbrennstoffen unterscheiden sich deutlich von den Holzstäuben. Sie weisen erheblich geringere Staubkorngrößen auf. Insbesondere im Submikronbereich (aerodynamischer Partikeldurchmesser < 1 µm) kommt es zu einer überproportionalen Emissionszunahme verglichen mit Holz [10]. Offenbar ist die Abscheidung gerade dieser Feinstfraktionen auch im Kondensationsbetrieb schwierig, zumal der Taupunkt des Abgases nicht über den gesamten Querschnitt des Abgasstromes sondern lediglich in Strahlen entlang der Oberfläche der Wärmetauscherrohre unterschritten wird und somit eine mögliche Wirkung der Staubpartikel als Kondensationskeime begrenzt bleibt. Mögliche Verbesserungen könnten sich durch eine Vergrößerung der Wärmetauscherfläche oder eine Verringerung des Rauchgasstromes ergeben.

**Einfluss der Heizleistung.** Bei den Versuchen zeigte sich, dass eine Halbierung der Heizlast in der Regel mit einem geringeren Staubabscheidegrad verbunden war (Abbildung 14). Allerdings lag die Gesamtstaubemission bei kleinster Wärmeleistung (30 kW) – zumindest bei den Versuchen mit 30 % Brennstoffwassergehalt – untypischerweise deutlich höher.

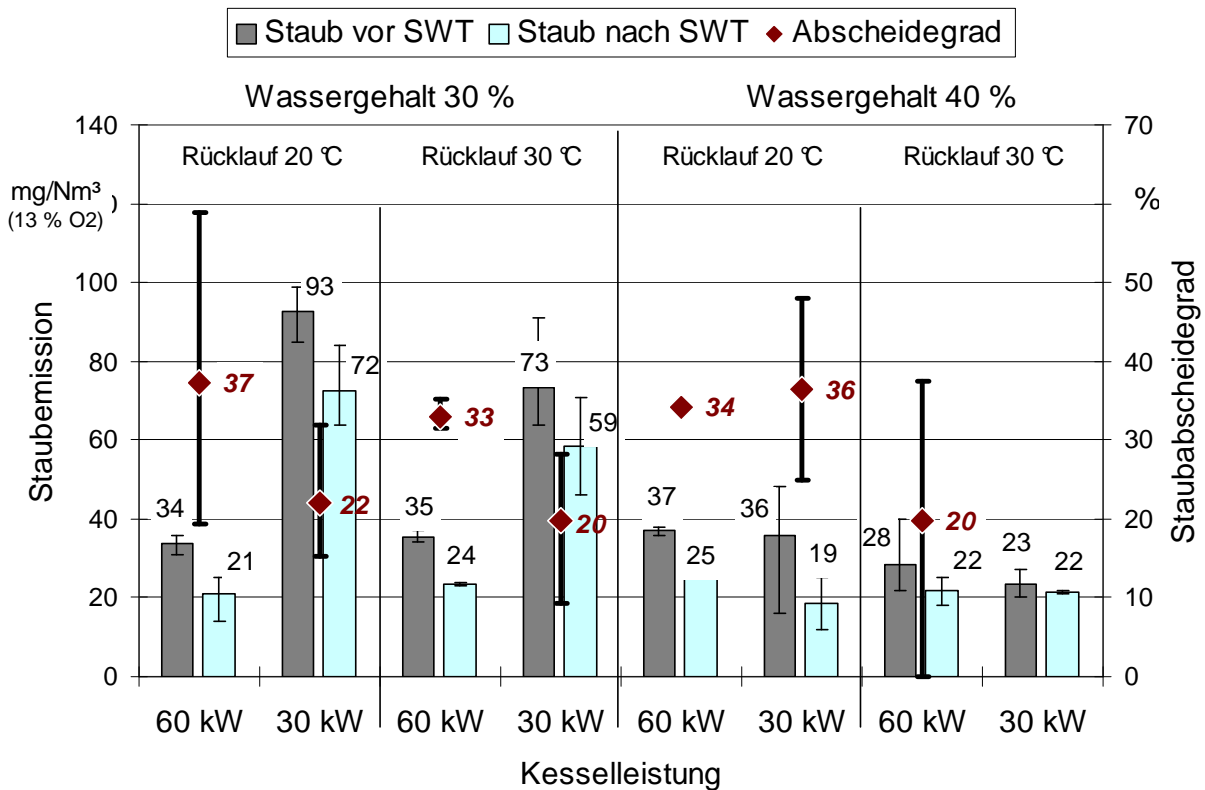


Abbildung 14: Staub-Emissionsminderung durch Einsatz des Sekundärwärmetauschers mit Kondensationsbetrieb bei verschiedenen Heizleistungen, Rücklauftemperaturen und Brennstoffwassergehalten. Mittelwertdarstellung für jeweils drei Wiederholungsmessungen

**Einflüsse durch Quenchwasserzugabe.** In den Versuchen mit Quenchwasserzugabe zeigte sich keine Verbesserung der Staubabscheidung. Das gilt sowohl für die einfache Wassereindüsung als auch bei Verwendung einer druckluftbeaufschlagten Zweistoffdüse zur feineren Vernebelung der zugeführten Wassermenge (Abbildung 15). Die Wassereindüsung kann aber dennoch für eine kontrollierte Abreinigung von Ablagerungen an den Wärmetauscherrohren sinnvoll sein. Diese Reinigung könnte allerdings auch diskontinuierlich je nach Verschmutzungsgrad über eine Revisionsöffnung erfolgen.

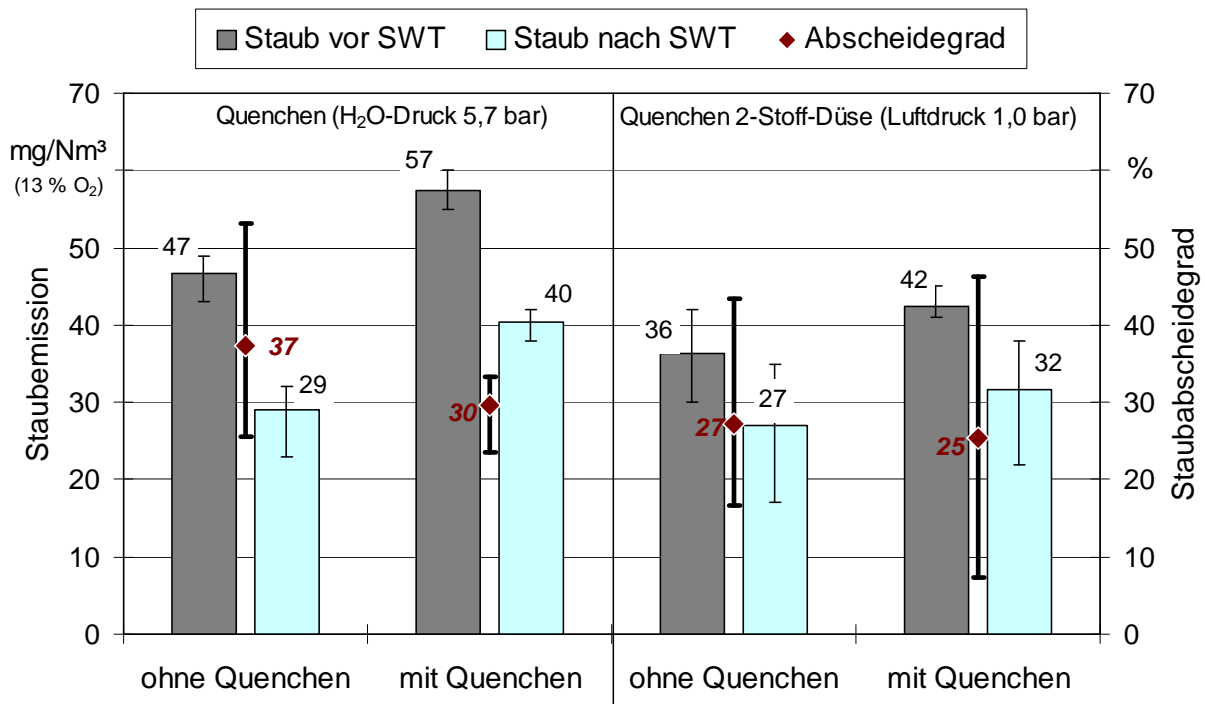


Abbildung 15: Staub-Emissionsminderung durch Einsatz des Sekundärwärmetauschers mit Kondensationsbetrieb bei der Zugabe von Quenchwasser. Alle Messungen wurden bei ca. 10 % Brennstoffwassergehalt und ca. 60 kW Heizleistung durchgeführt. Mittelwertdarstellung für jeweils drei Wiederholungsmessungen

**Messwertwiederholbarkeit.** Generell ist festzustellen, dass gerade für den Parameter Staub eine Wiederholbarkeit der Einzelmesswerte nur in relativ geringem Maße gegeben ist, da sich auch bei einer automatisch beschickten Feuerung kaum wirklich stationäre Betriebszustände einstellen lassen. Das lässt sich auch am Variationskoeffizienten für Staub ablesen, der über alle Versuche für die jeweils aufeinander folgenden drei Wiederholungsmessungen gemittelt bei 16 % lag. Hier wirkten sich die geringe Homogenität der Brennstoffeigenschaften (Korngröße, Wasser- und Aschegehalt), die periodischen mechanischen Störungsvorgänge im Glutbett durch die getaktete Brennstoffeinspeisung sowie regelmäßige Veränderung und Eingriffe in die Primär- und Sekundärluftzufuhr durch die elektronisch gesteuerte automatische Leistungsanpassung als unvermeidliche Schwankungsursachen aus.

### 3.3 Wirkungen auf die übrigen Schadstoffemissionen

Neben dem Zielparameter Staub wurden weitere Messgrößen erfasst. Der Kondensationsbetrieb führte hier jedoch zu keinerlei Verbesserungen. Das gilt für die parallel vor und nach dem Sekundärwärmetauscher kontinuierlich erfassten Schadstoffe Kohlenstoffmonoxid (CO), flüchtige organische Kohlenstoffverbindungen (C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>) und Stickstoffmonoxid (NO). Die gemessenen Unterschiede waren minimal, wobei Abweichungen sowohl nach oben als auch nach unten auftraten. Sie bewegen sich aber innerhalb der üblichen Messschwankungen.

Eine vollständige Zusammenstellung aller hierzu gemessenen mittleren Emissionswerte findet sich im Datenanhang.

### 3.4 Kondensatmengenanfall

**Wassergehaltseinfluss.** Das spezifische Kondensatvolumen je Einheit Nutzenergie (vom Kessel abgegebene kWh) hängt im wesentlichen vom Brennstoffwassergehalt und dem Grad der Abgaskühlung ab (Rücklauftemperatur). Das zeigt Abbildung 16. Bei Holzhackschnitzeln führt die Absenkung der Rücklauftemperatur von 30 auf 20 °C zu einer 30- bis 50-prozentigen Steigerung, wobei diese relative Zunahme bei den trockeneren Brennstoffen höher ausfällt, als bei feuchten. Für einen "Standardfall" mit einem Brennstoffwassergehalt von 30 % und einer Rücklauftemperatur von 30 °C bedeutet dies, dass ca. die Hälfte des im Abgas insgesamt enthaltenen Wassers kondensiert werden kann. Das ergibt sich durch Betrachtung des dargestellten Kondensatanfalls im Vergleich zur Gesamtfracht im Abgas (vgl. hierzu Abbildung 1, S. 11).

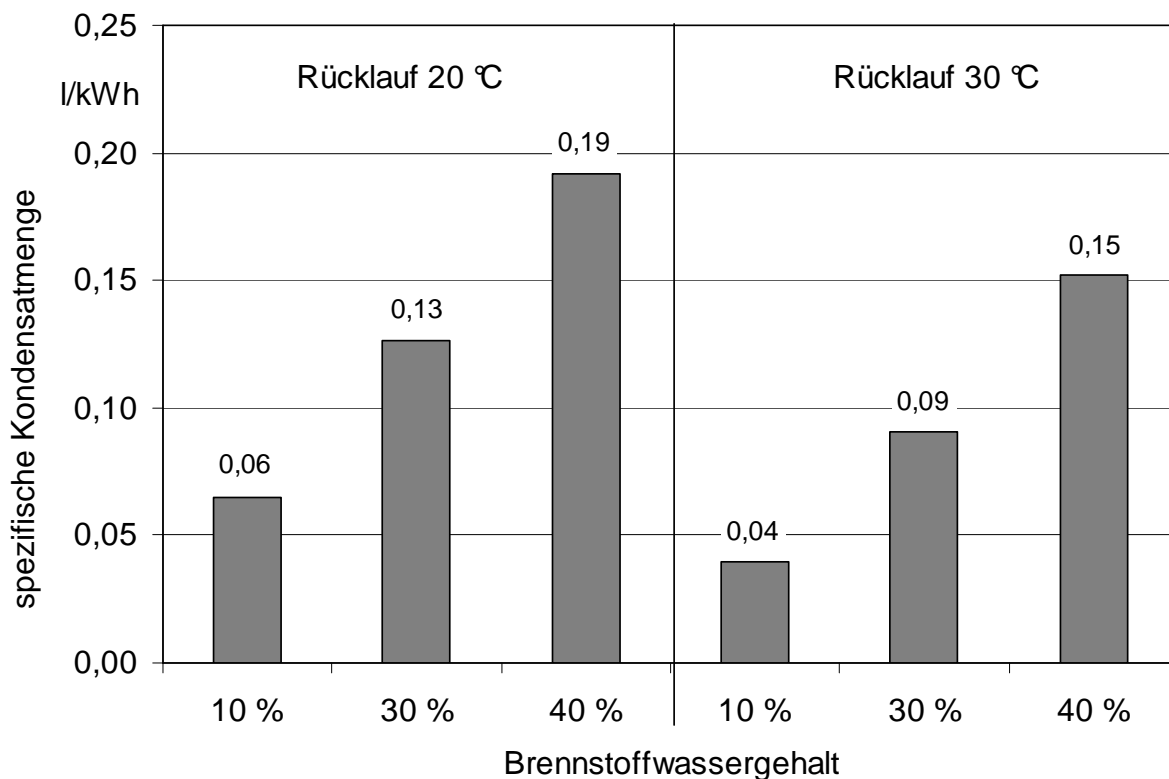


Abbildung 16: Spezifischer Kondensatanfall durch den eingesetzten Sekundärwärmetauscher bezogen auf die vom Kessel abgegebene Wärme: Einfluss verschiedener Hackschnitzel-Wassergehalte und Rücklauftemperaturen. Alle Messungen wurden bei 60 kW Heizleistung durchgeführt.

**Brennstoffarteneinfluss.** Bei den Halmgutbrennstoffen kam es ebenfalls zu einer Zunahme des Kondensatanfalls. Das zeigt Abbildung 17, wobei darin die Varianten mit annähernd gleichem Brennstoffwassergehalten von ca. 10 % verglichen werden (zu den Wassergehalten vgl. Tabelle 2). Der höchste Kondensatanfall wurde bei Triticalekörnern festgestellt. Die Ursache für diese Beobachtung ist nicht feststellbar. Unterschiede im Wasserstoffgehalt lassen sich als Begründung für einen Anstieg in dieser Größenordnung kaum heranziehen, das ergibt sich aus den relativ einheitlichen Wasserstoffkonzentrationen in Tabelle 3, die auf Datenbankrecherchen zurückgehen

[7]. Separate Elementaranalysen wurden im Rahmen der vorliegenden Untersuchung nicht durchgeführt.

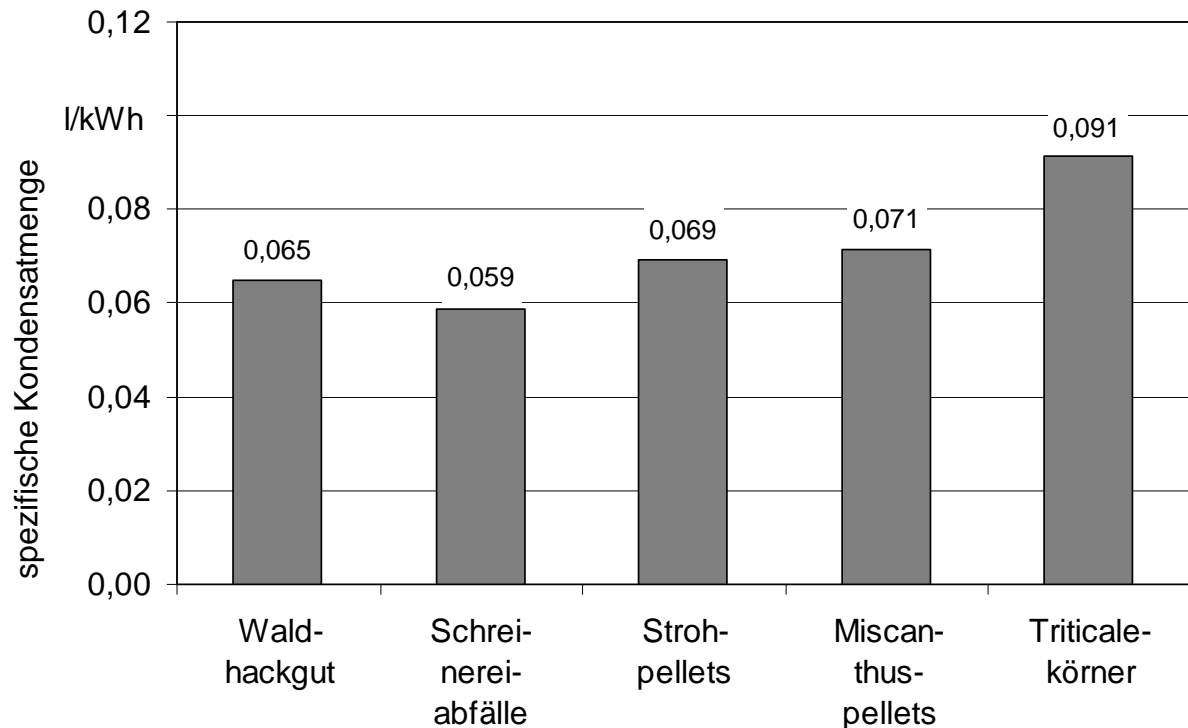


Abbildung 17: Spezifischer Kondensatanfall durch den eingesetzten Sekundärwärmetauscher bezogen auf die vom Kessel abgegebene Wärme: Einfluss verschiedener Brennstoffarten. Alle Messungen wurden bei 60 kW Heizleistung und mit einem einheitlichen Brennstoffwassergehalt von ca. 10 % durchgeführt.

**Einfluss der Heizlast.** Im Gegensatz zu den Brennstoffarten wirken sich die unterschiedlichen Heizlasten nicht auf die gebildete Kondensatmenge aus. Diese Beobachtung wurde einheitlich bei beiden Varianten des Brennstoffwassergehaltes ( $w = \text{ca. } 30$  und  $40 \%$ ) sowie bei beiden untersuchten Rücklauftemperaturen ( $20$  und  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ ) getroffen (Abbildung 18).

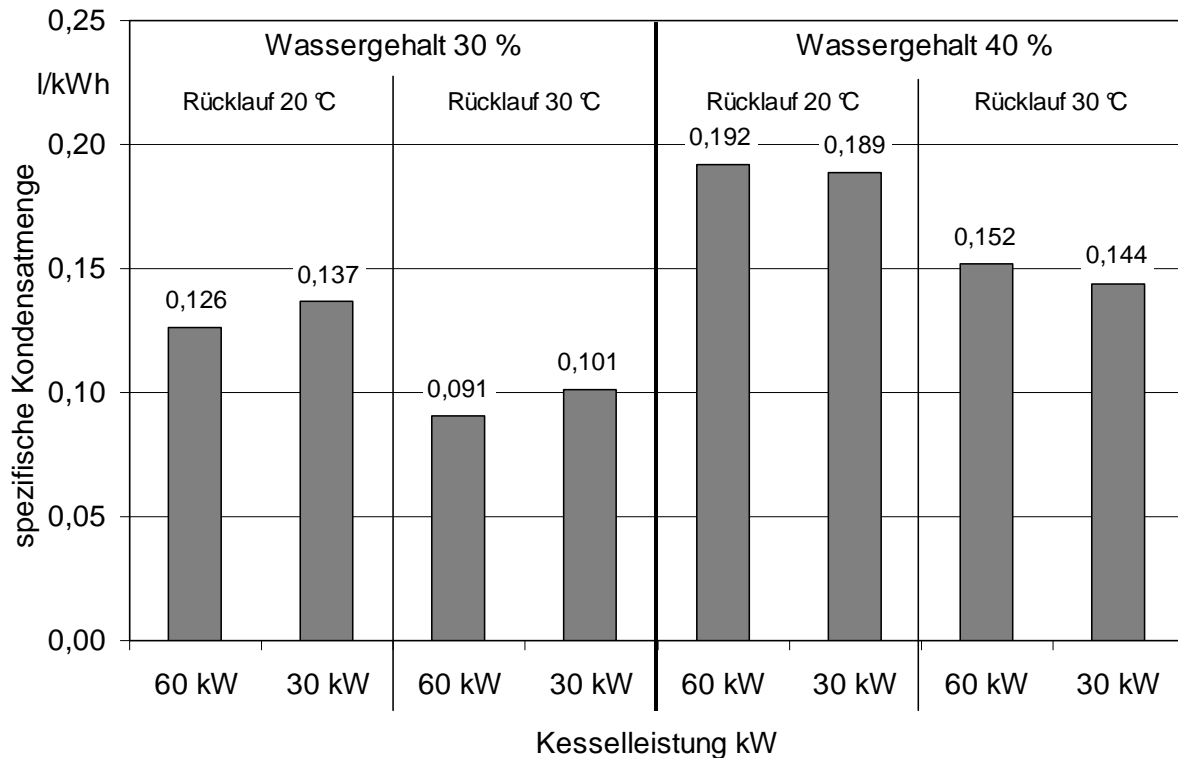


Abbildung 18: Spezifischer Kondensatanfall durch den eingesetzten Sekundärwärmetauscher bezogen auf die vom Kessel abgegebene Wärme: Einfluss der verschiedenen Heizlasten bei verschiedenen Brennstoffwassergehalten und Rücklauftemperaturen

### 3.5 Kondensatqualität

Die Qualität der gebildeten Kondensate wird durch die hier bestimmten Schwermetallgehalte (Tabelle 7), durch den gemessenen pH-Wert sowie die Chlorid-, Nitrid-, Nitrat- und Sulfatgehalte (Tabelle 6) beschrieben. Eine Untersuchung organischer Schadstoffkomponenten erfolgte nicht.

Die Kondensatqualität ist vor allem abhängig von der verwendeten Brennstoffart. Triticalekörner aber auch die beiden anderen Halmgutbrennstoffe erweisen sich als besonders nachteilig. Die Schwermetallkonzentrationen liegen hier fast durchgehend höher als bei den beiden Holzbrennstoffen. Das zeigt Tabelle 7, in der die Gehaltsangaben für die Kondensate sowohl in mg/kWh (zum Vergleich mit den deutschen Richtwerten) als auch in µg/l (zum Vergleich mit den österreichischen Grenzwerten) ausgewiesen werden.

Bei Zink und Cadmium kam es jedoch auch bei den Holzbrennstoffen zu auffälligen Werten. Hier ist teilweise keine Übereinstimmung mit den deutschen Richtwerten bzw. mit den österreichischen Grenzwerten gegeben. Alle anderen Schwermetallgehalte lagen bei den Holzkondensaten zum Teil deutlich unter den Beurteilungswerten. Dabei zeigte sich, dass die Brennstoffvariante mit nur ca. 12 % Wassergehalt keine erhöhten Konzentrationen aufwies. Zum Teil lagen die Werte bei den übrigen feuchteren Brennstoffvarianten sogar erheblich darüber, obgleich hier eine Verdünnung der Konzentrationen infolge des erhöhten Kondensatanfalls zu erwarten gewesen wäre (Tabelle 7). Hierin spiegelt sich die Tatsache wider, dass bei Biobrennstoffen gerade bei den Spurenelementen hohe (relative) Schwankungen der Elementgehalte üblich sind [7], obgleich es sich im vorliegenden Fall um eine einheitliche Brennstoffpartie handelte (Waldhackgut mit Rinde,

Ästen und Nadeln), die lediglich in unterschiedlichen Trocknungsstadien eingesetzt wurde.

Für allgemeingültige Aussagen über das Risiko einer überhöhten Schwermetalleinleitung in das Abwassersystem bei der Kondensatbeimischung zum häuslichen Abwasser sind daher weitere Messungen mit anderen Brennstoffen erforderlich. Allerdings werden bei der Beurteilung von Kondensaten in Deutschland in der Regel regionale Merkblätter befolgt, in denen Schwermetallkonzentrationen keine Berücksichtigung finden. Als Beispiel ist hierfür das Merkblatt Nr. 4.5/3 "Einleiten von Kondensaten von Feuerungsanlagen in Entwässerungsanlagen" des Bayerischen Landesamts für Wasserwirtschaft zu nennen [3], darin werden seit August 2000 auch die Kondensate von Holzfeuerungen angesprochen.

Auch bei den pH-Werten ist eine große Variationsbreite der Messwerte festzustellen. Der pH-Wert war besonders niedrig bei den Kondensaten aus der Stroh-, Miscanthus- und Triticale-Verbrennung (pH 2,2, 1,7 und 2,0). Dies kann durch den höheren Chlorgehalt dieser Brennstoffe erklärt werden, was sich am ebenfalls erhöhten Chlorgehalt im Kondensat ablesen lässt (Tabelle 8). Allerdings kam es auch bei einigen Holzbrennstoffen zu niedrigen pH-Werten um ca. 3,0. Anhand des Versauerungspotenzials von Nitrat oder Sulfat lässt sich die Ursache hierfür jedoch nicht erklären, hier könnte es allerdings zur Bildung von organischen Säuren gekommen sein. Eine Neutralisationspflicht ist bei Holzbrennstoffen in der Regel für Anlagen in der vorliegenden Leistungsklasse nicht gegeben [1].

Tabelle 7: *Schwermetallkonzentrationen im Kondensat der verschiedenen untersuchten Biomassebrennstoffe und Übereinstimmung mit Begrenzungen bzw. Richtwerten in Deutschland und Österreich*

Brennstoff	Einheit	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
<i>Richtwerte Deutschland<sup>a</sup></i>	<i>mg/kWh</i>	<i>0,0014</i>	<i>0,0210</i>	<i>0,0350</i>	<i>0,0350</i>	<i>0,0280</i>	<i>0,0700</i>
Holzhackgut, W=11,9 %	mg/kWh	0,003	<0,008	0,005	0,002	0,005	0,429
Holzhackgut, W=29,8 %	mg/kWh	0,005	<0,008	0,008	<0,003	0,014	0,816
Holzhackgut, W=30,4 %	mg/kWh	0,005	<0,008	0,009	<0,003	0,029	0,572
Holzhackgut, W=44,2 %	mg/kWh	0,005	<0,008	0,013	0,003	0,009	0,763
Triticale	mg/kWh	0,006	0,045	0,046	0,058	0,067	0,992
Stroh	mg/kWh	0,003	0,030	0,005	0,036	0,022	0,312
Miscanthus	mg/kWh	0,006	0,036	0,014	0,041	0,071	0,786
<i>Grenzwerte in Österreich<sup>b</sup></i>	<i>µg/l</i>	<i>50</i>	<i>500</i>	<i>500</i>	<i>500</i>	<i>500</i>	<i>2000</i>
Holzhackgut, W=11,9 %	µg/l	45	<50	81	26	74	6600
Holzhackgut, W=29,8 %	µg/l	38	<50	65	<20	113	6460
Holzhackgut, W=30,4 %	µg/l	51	<50	88	<20	284	5650
Holzhackgut, W=44,2 %	µg/l	28	<50	74	21	54	4490
Triticale	µg/l	62	495	500	637	741	10900
Stroh	µg/l	38	427	79	521	313	4500
Miscanthus	µg/l	90	497	200	573	990	11000

<sup>a</sup> nach ATV-DVWK-A 251[1]; Eine Neutralisation ist nicht erforderlich bei Kesseln bis 200 kW Nennwärmeleistung

<sup>b</sup> Quelle: AEV [2]; Eine Neutralisation ist nicht erforderlich; W= Brennstoffwassergehalt

*Tabelle 8: Gemessene Gehaltskonzentrationen an kritischen Elementen und pH-Wert im Kondensat*

Brennstoff	pH	Cl mg/l	NO <sub>2</sub> mg/l	NO <sub>3</sub> mg/l	SO <sub>4</sub> mg/l
Fichtenhackgut, w = 11,9 %	5,2	35	12,0	19,1	184
Fichtenhackgut, w = 29,8 %	3,5	26	<0,4	11,5	112
Fichtenhackgut, w = 30,4 %	2,9	31	<0,4	7,9	158
Fichtenhackgut, w = 44,2 %	6,4	16	28,9	6,1	175
Triticale	2,0	940	<3	20,5	227
Stroh	2,2	948	<3	16,8	501
Miscanthus	1,7	1460	<3	5,5	143

## 4 Zusammenfassung

Durch den Einsatz eines Wärmetauschers, durch den die anfallenden Abgase zumindest in Teilströmen unter den Taupunkt abgekühlt werden, lässt sich die Wärmeausnutzung des Brennstoffs beachtlich steigern. Dieser Prozess, der mittlerweile bei Erdgas- und Heizölfeuerungen Stand der Technik ist, führt zu Systemwirkungsgraden von über 100 % (bezogen auf den unteren Heizwert  $H_u$ ). Auch bei Holzfeuerungen ist dieser Effekt nachweisbar, zumal hierfür durch den immer vorhandenen Wassergehalt im Brennstoff besonders günstige Bedingungen für die Gewinnung von latenter Wärme aus dem Abgas gegeben sind.

In der vorliegenden Untersuchung konnte mit Hilfe eines Sekundärwärmetauschers (BOMAT - AWR 532), der als Zusatzbauteil mit einer herkömmlichen Holzhackschnitzelfeuerung (HDG Compact C100) kombiniert wurde, eine Steigerung der abgegebenen Wärmeleistung von durchschnittlich 18 % gemessen werden. Da dieser Effekt ausschließlich auf eine bessere Ausnutzung der eingesetzten Brennstoffenergie zurückgeht, steigt auch der Wirkungsgrad entsprechend. Während die Brennstoffausnutzung bei einem konventionellen Hackschnitzelkessel üblicherweise bei 85 bis 90 % liegt, kommt es durch den Sekundärwärmetauscher zu einem Anstieg auf über 100 %. Dieser Effekt ist besonders deutlich bei feuchteren Brennstoffen (Wirkungsgrad bis 106 % bei 40 % Wassergehalt in Brennstoff). Der Wirkungsgrad sinkt dagegen um ca. 2 Prozentpunkte, sobald die Rücklauftemperatur des für die Kühlung der Abgase eingesetzten Heizkreislaufwassers von 20 °C auf 30 °C erhöht wird.

Durchgehend für alle Versuche lässt sich eine signifikante Verminderung der Staubemissionen durch den Einsatz des Sekundärwärmetauschers feststellen. Bei Holzhackschnitzeln liegt der Abscheidegrad des Sekundärwärmetauschers in einer Größenordnung von 20 bis 37 %. Höhere Brennstoffwassergehalte wirkten sich hier jedoch nicht positiv aus. Eine Absenkung der Rücklauftemperatur um 10 Kelvin (von 30 auf 20 °C) erweist sich allerdings als vorteilhaft (4 bis 14 Prozentpunkte höhere Staubabscheidegrade).

Bei den untersuchten Nicht-Holz-Brennstoffen (Getreidestroh- und Miscanthuspellets sowie Triticalekörner), bei denen die Staubmesswerte insgesamt deutlich erhöht waren, war der Staubabscheidegrad des Sekundärwärmetauschers geringer als bei Holzbrennstoffen. Auch eine Halbierung der Heizlast führte in der Regel zu geringeren Staubabscheidegraden. Keine Vorteile beim Staubausstoß zeigten sich in den Versuchen mit Quenchwasserzugabe, selbst wenn eine druckluftbeaufschlagte Zweistoffdüse zur feineren Vernebelung der zugeführten Wassermenge verwendet wurde.

Im Gegensatz zu den deutlichen Minderungseffekten beim Staubausstoß konnten bei den übrigen Abgasschadstoffkomponenten Kohlenstoffmonoxid (CO), flüchtige organische Kohlenstoffverbindungen ( $C_nH_m$ ) und Stickstoffmonoxid (NO) keine Verbesserungen festgestellt werden.

Analog zum o.g. Wirkungsgrad besteht auch beim Kondensatanfall eine Abhängigkeit vom Brennstoffwassergehalt. Wenn dieser praxisüblich zwischen 10 und 40 % variiert, schwankt auch die gebildete Kondensatmenge je nach Betriebsbedingungen zwischen ca. 0,05 und 0,2 Litern je Kilowattstunde Wärme (bezogen auf die abgegebene Kesselwärme), wobei die o.g. Absenkung

der Rücklaufemperatur um 10 Kelvin eine Steigerung um 30 bis 50 % verursacht. Bei etwa gleichem Brennstoffwassergehalt (hier um ca. 10 %) kommt es mit dem verwendeten Getreidekörner-Brennstoff zum höchsten spezifischen Kondensatmengenanfall, während (trockene) Holzbrennstoffe weniger Kondensat bilden.

Die Kondensatqualität ist vor allem abhängig von der verwendeten Brennstoffart. Triticalekörner aber auch die beiden übrigen Halmgutbrennstoffe (Stroh- und Miscanthuspellets) erweisen sich dabei als besonders nachteilig. Die Schwermetallkonzentrationen im Kondensat liegen hier fast durchweg höher als bei den beiden Holzbrennstoffen. Auch der pH-Wert ist mit 1,7 bis 2,2 besonders niedrig. Dies kann durch den höheren Chlorgehalt in diesen Brennstoff erklärt werden.

**Fazit.** Der Einsatz eines Sekundärwärmetauschers mit Abgaskondensationsbetrieb stellt eine interessante Option zur Verbesserung des Systemwirkungsgrades und zur Minderung der Staubemissionen bei Holzfeuerungen dar. Das gilt besonders für Holzhackschnitzel mit ihrem vergleichsweise hohen Brennstoffwassergehalt. Bei der Verbrennung verursacht dieser aber – zusammen mit dem bei Holzfeuerungen meist relativ hohen Luftüberschuss – ein relativ großes Abgasvolumen, daher muss der Sekundärwärmetauscher bei gleicher Feuerungs-Nennleistung im Vergleich zum Heizöl- oder Erdgasbetrieb deutlich größer ausgelegt sein.

Bei der Minderung des Staubausstößes kann davon ausgegangen werden, dass die hier gemessenen Abscheidegrade am unteren Ende der technischen Möglichkeiten liegen. Eine gezielte Verbesserung und Weiterentwicklung des Sekundärwärmetauschers zur Steigerung der Staubabscheideleistung wäre wünschenswert.

Für die Anwendung des Sekundärwärmetauschers in der breiteren Praxis ist eine Verwendung der gewonnenen Niedertemperaturwärme erforderlich. Bei vielen Betreibern von Hackschnitzelfeuerungen (z. B. in Altgebäuden auf landwirtschaftlichen Betrieben) liegen diese Bedingungen jedoch heute noch nicht vor, zugleich sind dort auch die Kosten für die Bereitstellung des Brennstoffs eher gering. Chancen für einen wirtschaftlichen Einsatz eines Zusatzwärmetauschers bestehen daher vor allem bei Neuanlagen in Neubauten und bei Pelletheizungen, bei denen relativ teurer Brennstoff durch die Wirkungsgradsteigerung eingespart werden kann und bei denen Niedertemperaturanwendungen durch eine häufig vorhandene Energiesparbauweise begünstigt wird.

Eine Erprobung des Sekundärwärmetauschers im Langzeitbetrieb unter einer längeren Holzabgasbelastung steht noch aus. Eine solche Untersuchung ist erforderlich, um die möglichen Veränderungen im Wärmeübergang der keramischen Wärmetauscherrohre festzustellen und um die erforderlichen Wartungs- und Reinigungsintervalle festzulegen sowie den Langzeitnutzungsgrad des Wärmetauschers zu bestimmen.

## 5 Quellenverzeichnis

- [1] Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 251: Kondensate aus Brennwertkesseln.
- [2] Abwasseremissionsverordnung Österreich, BGBl. Nr. 218/2000
- [3] Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft: Einleiten von Kondensaten von Feuerungsanlagen in Entwässerungsanlagen, Merkblatt Nr. 4.5/3, vom 30. Aug. 2000
- [4] DIN 51 718 (01/1978): Feste Brennstoffe - Bestimmung des Wassergehaltes. Hrsg.: Deutsches Institut für Normung. Beuth Verlag, Berlin
- [5] DIN 4702, Teil 2 (03/1990): Heizkessel – Regeln für die heiztechnische Prüfung. Hrsg.: Deutsches Institut für Normung. Beuth Verlag, Berlin
- [6] DIN EN 303-5, Teil 5 (1999): Heizkessel für feste Brennstoffe, hand- und automatisch beschickte Feuerungen, Nenn-Wärmeleistungen bis 300 kW. Begriffe, Anforderungen, Prüfungen und Kennzeichnung. Deutsches Institut für Normung. Berlin, Beuth Verlag, 28 S.
- [7] Hartmann, H.; Böhm, T.; Maier, L. (2000): Naturbelassene biogene Festbrennstoffe - Umweltrelevante Eigenschaften und Einflussmöglichkeiten. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (Hrsg.), München, Reihe "Materialien", Nr. 154
- [8] Hartmann, H. (2004): Verbrennung von Getreidekorn – Technik und Wirtschaftlichkeit. In: Die Landwirtschaft als Energieerzeuger. KTBL-Tagung vom 30.-31. März 2004 in Osnabrück, Landwirtschaftsverlag, Münster, S. 193-205, KTBL-Schrift 420
- [9] Launhardt, T.; Hurm, R.; Schmid, V.; Link, H. (1998): Dioxin- und PAK-Konzentrationen in Abgas und Aschen von Stückholzfeuerungen. Hrsg: Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen. München, Selbstverlag, 149 S. Schriftenreihe „StMLU-Materialien“ Nr. 142
- [10] Launhardt, T.; Hartmann, H.; Link, H.; Schmid, V. (2000): Verbrennungsversuche mit naturbelassenen biogenen Festbrennstoffen in einer Kleinf Feuerungsanlage – Emissionen und Aschequalität. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (Hrsg.), München, Reihe "Materialien", Nr. 156, 133 S.
- [11] TFZ (2004): Noch unveröffentlichte Messungen im Rahmen des Projektes "Vergleichende Untersuchungen zur Aussagefähigkeit der Überwachungsmessungen nach der 1. BImSchV bei Kleinf Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe (FKZ 201 44 315)" des Umweltbundesamtes Berlin. Technologie- und Förderzentrum (TFZ), Straubing
- [12] ÖNORM M 7133: Energiehackgut, Anforderungen und Prüfbestimmungen. Österreichisches Normungsinstitut (Hrsg.), Wien, Österreich, 1998, 7 S.
- [13] VDI 2066, Blatt 1 (10/1975): Messen von Partikeln - Staubmessungen in strömenden Gasen - Gravimetrische Bestimmung der Staubbelastung - Übersicht. Hrsg.: Verein Deutscher Ingenieure. Berlin, Beuth Verlag
- [14] VDI 2066, Blatt 3 Entwurf (04/1986): Messen von Partikeln - Manuelle Staubmessung in strömenden Gasen - Gravimetrische Bestimmung geringer Staubgehalte. Hrsg.: Verein Deutscher Ingenieure. Berlin, Beuth Verlag
- [15] VDI 3481, Blatt 1 (08/1975): Messung gasförmiger Emissionen – Messen der Kohlenwasserstoff-Konzentration – Flammen-Ionisations-Detektor (FID). Hrsg.: Verein Deutscher Ingenieure. Berlin, Beuth Verlag



**Übersicht über die Versuchsvarianten (tatsächliche Betriebseinstellungen) sowie die Betriebsparameter in allen durchgeführten Versuchen**

(Mittelwerte aus jeweils mindestens 3 Wiederholungsmessungen). Bei den Brennstoffwassergehalten war ein Sollwert von 10 % 30 % und 40 % angestrebt worden und bei der Hackschnitzel-Kesselleistung galt ein Zielwert von 30 bzw. 60 kW. Die Istwerte weichen hiervon naturgemäß etwas ab.

Vers.-Nr.	Versuchsvarianten (Abstufungen)				gemessene Betriebsparameter																							
	Brennstoff	Quench- trieb bzw. - menge l/h	Wasser- gehalt %	Kessel- leistung kW	Leistung Abgwt. kW	Abgasverlust nach Kessel Abgwt.		Konden- sat- anfall l/h	Temp. Hydraulik Abgwt. °C		Abgastemp. Bomat °C			Abasvolumenstrom m³/h			Kaminruck Pascal			CO <sub>2</sub> Vol.-%			Lambda			Wasserdampfgehalt % bez. auf Abgas tr.		
						%	%		Rückl.	Vorl.	Eintritt	Austritt	Diff.	vor	nach	Diff.	vor	nach	Diff.	vor	nach	Diff.	vor	nach	Diff.	vor	nach	Diff.
03-12-09-NT20 Q	Hackgut	21,8	11,9	60,7	8,8	12,0	2,7	24,0	19,9	24,7	193,3	59,0	134,3	266,7	183,0	83,7	-30,0	-65,3	35,3	11,3	11,5	1,8	1,8	0,0	10,1	6,6	3,5	
03-12-17-NT30 Q2	Hackgut	7,97	14,9	63,2	8,3	12,4	2,9	9,9	30,1	34,8	206,0	65,7	140,3	287,7	200,0	87,7	-32,7	-77,0	44,3	11,8	11,8	1,7	1,7	0,0	10,4	9,5	0,9	
03-12-09-NT20	Hackgut	nein	11,9	63,1	9,2	11,8	3,1	4,1	21,0	26,2	201,3	68,0	133,3	271,7	187,3	84,5	-29,7	-78,7	49,0	12,0	12,1	1,7	1,7	0,0	10,1	6,8	3,3	
03-12-08-NT30	Hackgut	nein	11,7	60,2	7,0	11,7	3,4	2,4	29,6	33,5	185,7	69,7	116,0	219,4	157,7	61,7	-23,0	-69,0	46,0	11,3	11,4	1,8	1,8	0,0	10,1	7,4	2,7	
03-12-15-NM20	Hackgut	nein	29,8	58,6	11,6	13,9	4,3	7,4	20,0	27,1	200,3	72,7	127,7	307,0	209,1	97,9	-30,0	-78,7	48,7	11,0	10,8	1,8	1,8	0,0	15,2	7,3	7,8	
03-12-15-NM30	Hackgut	nein	29,8	59,5	9,5	12,6	4,0	5,4	30,2	35,5	193,7	74,7	119,0	298,4	210,8	87,6	-38,7	-80,7	42,0	11,6	11,6	1,7	1,7	0,0	15,2	9,7	5,5	
03-12-16-TM20	Hackgut	nein	30,4	30,0	5,8	12,5	2,9	4,1	20,1	23,4	143,7	47,7	96,0	197,0	141,0	56,0	-20,0	-39,0	19,0	8,1	8,1	2,5	2,5	0,0	11,6	5,4	6,2	
03-12-16-TM30	Hackgut	nein	30,4	30,6	5,1	12,7	3,4	3,1	29,6	32,6	149,0	54,0	95,0	198,3	145,7	52,7	-18,7	-39,7	21,0	8,3	8,3	2,4	2,4	0,0	11,7	7,3	4,4	
03-11-18-NF20	Hackgut	nein	44,2	63,0	15,0	14,4	4,5	10,7	19,7	28,3	199,5	77,5	122,0	292,5	201,0	91,5	-6,5	-72,0	65,5	11,3	11,2	1,8	1,8	-0,1	19,4	10,3	9,1	
03-12-02-NF30	Hackgut	nein	40,1	65,2	13,8	13,9	4,7	9,9	30,0	37,8	204,7	84,0	120,7	318,3	224,0	94,3	32,7	-35,7	68,3	11,8	11,6	1,7	1,7	0,0	20,3	13,9	6,4	
03-12-04-TF20	Hackgut	nein	42,5	30,7	8,1	11,5	2,9	5,8	19,5	24,1	135,3	49,7	85,7	154,3	114,0	40,3	-15,3	-39,0	23,7	8,6	8,6	2,3	2,3	0,0	13,3	6,5	6,8	
03-12-04-TF30	Hackgut	nein	42,5	30,6	6,8	11,1	3,5	4,4	30,5	35,0	137,3	57,3	80,0	154,3	116,3	38,0	-12,3	-38,3	26,0	9,3	9,3	2,1	2,1	0,0	13,4	9,5	3,9	
04-01-08-NTriticale20	Triticalekorn	nein	12,1	70,0	15,6	23,3	8,0	6,4	20,0	30,2	262,0	106,4	155,6	450,4	312,8	137,6	94,8	-53,2	148,0	8,3	8,3	3,0	3,0	0,0	13,3	10,0	3,3	
04-01-13-NMiscanthus20	M.-Pellets	nein	10,7	70,0	11,4	13,8	3,9	5,0	20,3	28,2	227,7	80,7	147,0	305,0	206,0	99,0	-15,3	-72,0	56,7	12,1	12,1	1,7	1,7	0,0	11,0	7,6	3,4	
04-01-13-NStroh20	Strohpellets	nein	10,9	68,3	11,0	13,6	3,8	4,7	21,4	29,9	225,8	80,0	145,8	312,3	205,8	106,5	-18,8	-74,3	55,5	11,8	11,8	1,8	1,8	0,0	11,8	8,7	3,2	
04-01-15-NSpaene20	Holzspäne	nein	10,5	60,6	11,6	16,8	4,7	3,6	20,4	27,1	238,4	85,4	153,0	317,0	218,2	98,8	4,2	-69,2	73,4	9,8	9,8	2,1	2,1	0,0	10,1	7,1	3,0	
04-02-10-NT30Q2	Hackgut	7,44	13,1	66,5	9,3	15,1	3,7	7,9	30,2	35,5	231,3	68,3	163,0	282,7	190,7	92,0	-14,7	-77,3	62,7	11,3	11,3	1,8	1,8	0,0	9,6	9,4	0,2	

## Übersicht über die Schadstoffemissionen in allen durchgeführten Versuchsvarianten

(Mittelwerte aus jeweils mindestens 3 Wiederholungsmessungen). Bei den Brennstoffwassergehalten war ein Sollwert von 10 % 30 % und 40 % angestrebt worden und bei der Hackschnitzel-Kesselleistung galt ein Zielwert von 30 bzw. 60 kW. Die Istwerte weichen hiervon naturgemäß etwas ab.

Alle Emissionsangaben sind bezogen auf Abgas im Normzustand bei 13 % O<sub>2</sub>

Vers.-Nr.	Versuchsvarianten (Abstufungen)				Schadstoffemissionen									
	Brennstoff	Quench- betrieb bzw. - menge l/h	Wasser- gehalt %	Kessel- leistung kW	Staub mg/Nm <sup>3</sup>				CO mg/Nm <sup>3</sup>		NO mg/Nm <sup>3</sup>		CnH <sub>m</sub> mg/Nm <sup>3</sup>	
					vor	nach	Diff.	Diff. %	vor	nach	vor	nach	vor	nach
03-12-09-NT20 Q	Hackgut	21,8	11,9	60,7	57,3	40,3	17,0	29,5	152,7	160,7	170,7	188,3	1,0	1,0
03-12-17-NT30 Q2	Hackgut	7,97	14,9	63,2	44,0	39,7	4,3	9,8	75,0	78,3	168,0	178,7	1,0	1,0
03-12-09-NT20	Hackgut	nein	11,9	63,1	46,7	29,0	17,7	37,3	146,3	151,3	167,3	179,3	1,0	1,0
03-12-08-NT30	Hackgut	nein	11,7	60,2	36,3	27,0	9,3	27,2	73,3	78,7	161,0	174,3	1,0	1,0
03-12-15-NM20	Hackgut	nein	29,8	58,6	33,7	21,0	12,7	37,2	90,7	100,7	192,0	209,0	1,0	1,0
03-12-15-NM30	Hackgut	nein	29,8	59,5	35,3	23,7	11,7	33,0	102,7	108,3	198,3	209,3	1,0	1,0
03-12-16-TM20	Hackgut	nein	30,4	30,0	92,7	72,3	20,3	22,0	259,7	265,0	176,3	199,7	2,0	2,1
03-12-16-TM30	Hackgut	nein	30,4	30,6	73,3	58,7	14,7	19,8	359,7	362,0	194,3	217,0	3,0	2,9
03-11-18-NF20	Hackgut	nein	44,2	63,0	37,0	25,0	24,5	34,2	573,0	602,0	141,5	166,5	5,5	7,0
03-12-02-NF30	Hackgut	nein	40,1	65,2	28,3	21,7	6,7	19,7	185,0	200,7	172,0	187,7	1,0	1,5
03-12-04-TF20	Hackgut	nein	42,5	30,7	36,0	18,5	17,5	36,5	1883	2000	66,0	64,3	62,3	63,3
03-12-04-TF30	Hackgut	nein	42,5	30,6	23,3	21,5	1,8	-0,3	1590	1648	68,0	64,0	32,0	36,3
04-01-08-NTriticale20	Triticalekorn	nein	12,1	70,0	295	194	102	30,3	275,4	275,4	563,6	563,6	21,9	21,2
04-01-13-NMiscanthus20	M.-Pellets	nein	10,7	70,0	126	110	16,0	14,6	70,7	70,7	235,7	235,7	1,1	1,1
04-01-13-NStroh20	Strohpellets	nein	10,9	68,3	390	329	61,3	14,5	1500	1500	247,0	247,0	11,5	11,5
04-01-15-NSpaene20	Holzspäne	nein	10,5	60,6	71,0	48,8	22,2	32,2	448,2	448,2	151,4	151,4	3,9	3,9
04-02-10-NT30Q2	Hackgut	7,44	13,1	66,5	42,3	31,7	10,7	25,3	50,3	54,7	217,0	193,7	1,0	1,0

## Übersicht über die Wärmeleistungs- und Kondensatkenngößen in allen durchgeführten Versuchsvarianten

Mittelwerte aus jeweils mindestens 3 Wiederholungsmessungen). Bei den Brennstoffwassergehalten war ein Sollwert von 10 % 30 % und 40 % angestrebt worden und bei der Hackschnitzel-Kesselleistung galt ein Zielwert von 30 bzw. 60 kW. Die Istwerte weichen hiervon naturgemäß etwas ab. Weitere Kondensatkenngößen (Schwermetallgehalte, pH-Wert, sonstige Inhaltsstoffe) sind in Tabelle 7 und Tabelle 8 dargestellt.

Vers.-Nr.	Wärmeleistungs- und Kondensatkenngößen													
	Leistung Kessel		Abgasverlust nach Kessel		Leistung aus Abgas		Leistung aus Kondensat		Abgasverlust nach Kessel		Leistung aus Abgas		spezifischer Kondensat-anfall l/kWh Kessel	pH-Wert Kondensat
	kW	Abgw. kW	kW	Abgw. kW	kW	KW	Kessel %	Abgw. %	Kessel %	Abgw. %	Kessel %	Kondensat %		
03-12-09-NT20 Q	60,7	8,8	8,3	1,9	6,4	2,4	88,0	12,8	12,0	2,7	9,3	3,5	0,4	6,2
03-12-17-NT30 Q2	63,2	8,3	8,9	2,1	6,8	1,5	87,6	11,5	12,4	2,9	9,4	2,0	0,2	7,7
03-12-09-NT20	63,1	9,2	8,5	2,2	6,3	2,9	88,2	12,8	11,8	3,1	8,8	4,0	0,1	4,0
03-12-08-NT30	60,2	7,0	8,0	2,3	5,7	1,3	88,3	10,2	11,7	3,4	8,3	1,9	0,0	3,5
03-12-15-NM20	58,6	11,6	9,4	2,9	6,5	5,1	86,1	17,1	13,9	4,3	9,6	7,5	0,1	3,3
03-12-15-NM30	59,5	9,5	8,6	2,7	5,9	3,7	87,4	14,0	12,6	4,0	8,6	5,4	0,1	3,4
03-12-16-TM20	30,0	5,8	4,3	1,0	3,3	2,5	87,5	16,9	12,5	2,9	9,6	7,3	0,1	3,1
03-12-16-TM30	30,6	5,1	4,4	1,2	3,3	1,9	87,3	14,6	12,7	3,4	9,3	5,4	0,1	2,8
03-11-18-NF20	63,0	15,0	10,6	3,3	7,3	7,7	85,6	20,4	14,4	4,5	9,9	10,5	0,2	6,2
03-12-02-NF30	65,2	13,8	10,5	3,5	7,0	6,8	86,1	18,2	13,9	4,7	9,2	9,0	0,2	5,3
03-12-04-TF20	30,7	8,1	4,0	1,0	3,0	5,1	88,5	23,2	11,5	2,9	8,7	14,6	0,2	3,3
03-12-04-TF30	30,6	6,8	3,8	1,2	2,6	4,2	88,9	19,8	11,1	3,5	7,7	12,2	0,1	3,4
04-01-08-Ntriticale20	70,0	15,6	21,3	7,3	14,0	1,6	76,7	17,1	23,3	8,0	15,3	1,7	0,1	2,0
04-01-13-NMiscanthus20	70,0	11,4	11,2	3,1	8,1	3,4	86,2	14,1	13,8	3,9	9,9	4,2	0,1	1,8
04-01-13-NStroh20	68,3	11,0	10,7	3,0	7,7	3,2	86,4	13,9	13,6	3,8	9,8	4,1	0,1	2,2
04-01-15-NSpaene20	60,6	11,6	12,3	3,4	8,9	2,8	83,2	15,9	16,8	4,7	12,2	3,8	0,1	7,4
04-02-10-NT30Q2	66,5	9,3	11,8	2,9	8,9	0,3	84,9	11,8	15,1	3,7	11,4	0,4	0,1	



