

Landgraf, D. (Hrsg.)



## 2. ERFURTER TAGUNG

---

Schnellwachsende Baumarten – Erntetechniken, –verfahren und Logistik

vom 28.02. – 01.03.2019

# **Impressum**

## **Herausgeber**

© Fachhochschule Erfurt  
Fakultät Landschaftsarchitektur, Gartenbau und Forst  
Altonaer Str. 25  
99085 Erfurt  
Telefon +49(0)361/6700-0  
Telefax +49(0)361/6700-703  
www.fh-erfurt.de

## **Verantwortlich für den Inhalt:**

Prof. Dr. Dirk Landgraf

## **Gestaltung:**

Heidi Pfeifer, Karoline Schwandt, Dirk Landgraf

## **Druck:**

Handmann Werbung GmbH  
Heinrich – Credner – Str. 2  
99087 Erfurt

## **ISSN:**

Print 2567-8922  
Online 2627-9908

## **Stand:**

Februar 2019

Das Werk, einschließlich seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung ist ohne Zustimmung des Verlages und des Autors unzulässig. Dies gilt insbesondere für die elektronische oder sonstige Vervielfältigung, Übersetzung, Verbreitung und öffentliche Zugänglichmachung.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

# 7 Verbrennungsverhalten von KUP-Brennstoffen

Daniel Kuptz<sup>1</sup>, Claudia Schön<sup>1</sup>, Robert Mack<sup>1</sup>, Elisabeth Rist<sup>1</sup>, Elke Dietz<sup>2</sup>, Hans Hartmann<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für  
Nachwachsende Rohstoffe (TFZ)

<sup>2</sup> Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF)

**Abstract.** Bei der Produktion von KUP-Hackschnitzeln kommt es je nach Baumart, Klon, Standort, Umtriebszeit, Erntetechnik und Aufbereitung zu unterschiedlichen Brennstoffqualitäten. Die Hackschnitzel unterscheiden sich dabei wesentlich von Waldhackschnitzeln und variieren u. a. im Wassergehalt und in ihrer chemischen Zusammensetzung. Bei der Verbrennung von KUP-Hackschnitzeln ist daher mit höheren Emissionen an Kohlenmonoxid (CO), Stickoxiden (NO<sub>x</sub>) und Staub zu rechnen. Feuerungsversuche an Kleinfeuerungsanlagen (30 kW und 50 kW) am TFZ zeigten, dass geeignete Maßnahmen, z. B. die Trocknung, die Siebung oder die Pelletierung (inkl. Additivierung mit Kaolin) helfen könnten, die Brennstoffqualität zu verbessern. Eine weitere Empfehlung ist die Verwendung moderner Feuerungstechnik, vor allem die Nutzung elektrostatischer Staubabscheider.

**Keywords:** Brennstoffqualität, Verbrennungsverhalten, Holzhackschnitzel, Pellets, Kaolin, Emissionen

## 7.1 Einleitung

Viele Land- und Forstwirte betreiben eine eigene Hackschnitzelfeuerung. Den Brennstoff produzieren sie oft selbst, z. B. in Kurzumtriebsplantagen (KUP). Aber sind KUP-Hackschnitzel als Brennstoff für die eigene Heizung überhaupt zu empfehlen und in wie weit ist eine weiterführende Aufbereitung durch Trocknung, Siebung oder Pelletierung sinnvoll? Dieser Frage haben sich die Forscherinnen und Forscher des Technologie- und Förderzentrums (TFZ) in mehreren Projekten gestellt.

## 7.2 Material und Methoden

### 7.2.1 Brennstoffgewinnung und Brennstoffaufbereitung

Um die allgemeine Bewertung der Brennstoffqualität von KUP-Brennstoffen zu ermöglichen, wurde in mehreren Projekten am TFZ Brennstoffproben von KUP-Flächen gesammelt und analysiert. Daneben wurde auf bestehende Daten bereits abgeschlossener Projekte mit TFZ-Beteiligung zurückgegriffen. Auf diese Weise kamen, je nach Brennstoffparameter, bis zu 80 Datensätze zusammen.

Ein Teil der Brennstoffe wurde für Feuerungsversuche am Prüfstand des TFZ eingesetzt. Hierzu wurden die Brennstoffe durch Trocknung, Siebung oder Pelletierung aufbereitet. Für die Brennstofftrocknung kamen am TFZ selbstgebaute Niedrigtemperatur-Satztrocknerboxen zum Einsatz. Die jeweilige Gesamtprobe wurde in eine eigens konstruierte Holzkiste (1.160 × 390 × 790 mm) gefüllt. Als Bodenplatten für die Holzkiste wurden Lochsiebe mit 15 mm Lochdurchmesser verwendet. Die Trocknung erfolgte durch Belüftung der Probe mittels eines

mobilen Gebläses. Zwischen Gebläse und Trocknungskiste wurde ein Heizregister geschaltet und die Temperatur der Trocknungsluft auf 40 °C eingestellt. Der Zielwassergehalt variierte je nach Fragestellung des jeweiligen Projekts, betrug aber in allen Fällen < 35 m-%. Anschließend wurde die getrocknete Probe homogenisiert.

Ein Teil der Brennstoffchargen wurde nach der Trocknung mit einem ebenfalls selbstgebauten Trommelsieb mit der Lochweite von 8 mm (Rundloch) vorbehandelt. Die Siebung verringert somit hauptsächlich den Feinanteil. Anschließend wurde die gesiebte Probe homogenisiert.

Die Herstellung von KUP-Pellets mit einem Durchmesser von 6 mm erfolgte mit der Pelletieranlage am TFZ (Amandus Kahl GmbH & Co. KG, Typ 33-390). Hierbei handelt es sich um eine Flachmatrizenpresse. Ein Teil der Brennstoffe wurde zur Reduzierung der partikelförmigen Emissionen sowie zur Verbesserung des Ascheschmelzverhaltens additiviert. Als Additiv wurde das aluminiumbasierende Tonmineral Kaolin ausgewählt, welches zu 87 % aus reinem Kaolinit bestand. Die benötigte Menge an Additiv wurde stöchiometrisch ermittelt. Das Mischungsverhältnis betrug 1,5 m-% Kaolin zu 98,5 m-% KUP-Pappel (bezogen auf die Trockenmasse).

### 7.2.2 Brennstoffanalysen nach DIN EN ISO Norm für biogene Festbrennstoffe

Alle Brennstoffe wurden hinsichtlich ihrer physikalischen und inhaltsstofflichen Brennstoffeigenschaften (Wassergehalt, Aschegehalt, Heizwert, Schüttdichte, Partikelgrößenverteilung, Inhaltsstoffe) nach DIN EN ISO Norm (Tabelle 1) analysiert. Die physikalischen Analysen erfolgten am TFZ. Die Analyse der chemischen Inhaltsstoffe erfolgte in den Laboren des jeweiligen Projektpartners sowie in weiteren externen Laboren.

**Tabelle 2:** Analysemethoden für biogene Festbrennstoffe (wf = wasserfrei)

Qualitätsparameter	Labor	Methode (DIN EN ISO)
Wassergehalt (in m-%)	TFZ	18134-2/3
Aschegehalt (in m-%, wf)	TFZ	18122
Heizwert (in MJ/kg, wf)	TFZ	18125
Schüttdichte (in kg/m <sup>3</sup> )	TFZ	17828
Partikelgrößenverteilung (in m-%)	TFZ	17827-1
Mechanische Festigkeit von Pellets (in m-%)	TFZ	17831-1
Gesamtgehalt an C, H und N (in m-%, wf)	extern	16948
Hauptelemente (in mg/kg, wf)	extern	16967
Spurenelemente (in mg/kg, wf)	extern	16968
Chlor und Schwefel (in m-%, wf)	extern	16994

### 7.2.3 Feuerungsversuche an Kleinfeuerungsanlagen

Für die Untersuchung des Emissionsverhaltens von KUP-Hackschnitzeln kam in einer ersten Versuchsreihe eine 50 kW Kipprostfeuerung (HDG Compact 50) mit seitlichem Einschub zum Einsatz. In einer zweiten Versuchsreihe wurde ein 30 kW Biomassekessel (Guntamatic Powerchip 20/30) mit Treppenrost und seitlichem Einschub verwendet. In diesem wurden sowohl Pellets als auch Hackschnitzel aus Pappel verbrannt. Neben reinen Brennstoffen und additivierten Pellets konnte Kaolin über eine separate Förderschnecke direkt in die Zuführung des Kessels eingetragen werden. Somit kamen zusätzlich Brennstoffe zum Einsatz, die erst nach ihrer Produktion mit 1,5 m-% Kaolin (bezogen auf die Trockenmasse) vermischt wurden. Alle Messungen wurden auf dem Feuerungsprüfstand des TFZ durchgeführt. Der Aufbau der Abgasmessstrecke für die Bestimmung der Zusammensetzung der Abgase sowie der Gesamtstaubemissionen ist in Abbildung 1 dargestellt. Der Brennstoffvorratsbehälter befand sich auf einer Plattformwaage für die kontinuierliche Bestimmung des Brennstoffmassenstroms. Der Versuchsaufbau bestand abgasseitig aus einer senkrechten Messstrecke mit allen notwendigen Messöffnungen für die Bestimmung von Abgastemperatur, Förderdruck, Abgasgeschwindigkeit, gasförmigen Bestandteilen sowie für die Probenahme zur Bestimmung des Gesamtstaubgehalts gemäß VDI 2066, Blatt 1.

Im Rahmen des Messprogramms wurden folgende Anlagenparameter und Emissionsmessgrößen erfasst: Kohlenstoffmonoxid (CO), Stickoxide ( $\text{NO}_x$ ), flüchtige organische Kohlenwasserstoffe (Org.-C), Gesamtstaub, Sauerstoff ( $\text{O}_2$ ), Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ), Wasserdampfgehalt im Abgas ( $\text{H}_2\text{O}$ ), Wärmeleistung, Kesselwirkungsgrad, feuerungstechnischer Wirkungsgrad, Abgastemperaturen sowie der Förderdruck.

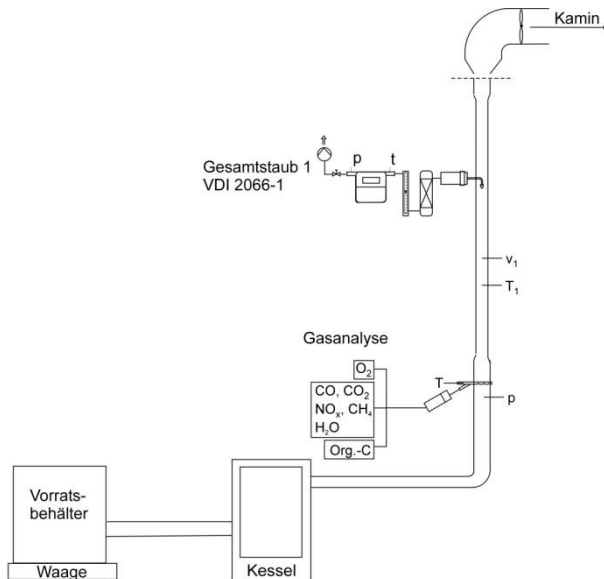


Abb. 2. Versuchsaufbau für die Feuerungsversuche am TFZ, Skizze nicht maßstäblich

## 7.3 Ergebnisse und Diskussion

### 7.3.1 Brennstoffqualität von KUP

Die Brennstoffqualität von KUP-Hackschnitzeln ist in vielen Punkten, z. B. im Aschegehalt, im Heizwert oder im Feinanteil zunächst ähnlich der Qualität von Hackschnitzeln aus Waldrestholz (siehe Tabelle 2). Auffällig war neben einem typischerweise für KUP-Hackschnitzel erhöhten Wassergehalt ein hoher Gehalt an verbrennungskritischen Inhaltsstoffen, vor allem an Stickstoff oder an aerosolbildenden, d. h. für die Feinstaubbildung mitverantwortlichen chemischen Elementen (Summe aus Kalium, Natrium, Blei und Zink). Besonders das Kalium ist als Feinstaubbildner relevant. Ebenso waren die Schwermetalle Cadmium und Zink im Vergleich zu Waldholz erhöht.

**Tabelle 3:** Mittlere Brennstoffqualität von KUP-Hackschnitzeln aus Pappel und Weide im Vergleich zum Grenzwert nach DIN EN ISO 17225-4 (Spezifikationen B1 und B2) sowie zu Hackschnitzeln aus Waldrestholz und Energierundholz (Quelle: Bericht aus dem TFZ Nr. 56, wf = wasserfrei)

Parameter	Einheit	DIN EN ISO 17225-4 B1/B2	Pappel	Weide	Waldrestholz (Wrh)	Energierundholz (Er)
Wassergehalt	m-%	-	53,6	51,0	47,2	50,7
Aschegehalt	m-%, wf	3,0	2,0	2,1	2,1	1,0
Heizwert	MJ/kg, wf	-	18,40	18,26	18,85	18,64
Feinanteil	m-%	10,0 (15,0)	6,4	5,6	14,2	8,9
Stickstoff	m-%, wf	1,00	0,33	0,48	0,33	0,16
Schwefel	m-%, wf	0,10	0,03	0,04	0,03	0,02
Chlor	m-%, wf	0,05	0,01	0,01	0,01	0,01
Cadmium	mg/kg, wf	2,0	0,33	0,85	0,19	0,14
Zink	mg/kg, wf	100	38	70	27	18
Aerosolbildner *	mg/kg, wf	-	2.954	2.648	1.661	1.112
davon Kalium	mg/kg, wf	-	2.898	2.570	1.610	1.076

\* Aerosolbildner = Summe der Elemente Kalium, Natrium, Blei und Zink in mg/kg

Der Wassergehalt bei erntefrischen KUP-Hackschnitzeln lag im Mittel bei 53 m-% (Pappel) bzw. bei 51 m-% (Weide). Damit war der Wassergehalt von KUP-Hackschnitzeln höher als die mittleren Wassergehalte erntefrischer Hackschnitzel aus Waldrestholz und Energierundholz (KUPTZ & HARTMANN 2015). Eine Verbrennung von KUP-Hackschnitzeln im erntefrischen Zustand ist daher für kleine Feuerungsanlagen nicht zu empfehlen. Von Kesselherstellern wird meist ein maximaler Wassergehalt von 30 m-% bis 35 m-%, häufig sogar deutlich unter 25 m-% vorgeschrieben. Folglich müssen die Hackschnitzel getrocknet werden.

Der Aschegehalt der KUP-Brennstoffe lag im typischen Bereich für Hackschnitzel aus Waldrestholz bzw. war minimal erhöht (Tabelle 2, KUPTZ & HARTMANN 2015). Bei den Brennstoffproben aus KUP konnte eine Bandbreite von ca. 1 bis 3 m-% festgestellt werden. Der Mittelwert lag bei ca. 2 m-%. Die meisten Hackschnitzel aus KUP konnten in die Spezifikation A3.0 nach DIN EN ISO 17225-4 (Aschegehalt < 3,0 m-%, wf) eingeordnet werden.

Die wasserfreien Heizwerte der KUP-Proben lagen im Mittel bei 18,4 MJ/kg und waren damit geringfügig niedriger als die Heizwerte der Referenzproben aus Waldrestholz und Energierundholz (Tabelle 2). Die Referenzproben bestanden vornehmlich aus Nadelholz. Der höhere Heizwert lässt sich somit auf die gegenüber Laubholz in Nadelholz tendenziell höheren Gehalte an Lignin und Harz zurückführen. Analog lagen die Heizwerte der Referenzproben aus Laubholz im Mittel ebenfalls bei ca. 18,4 MJ/kg (KALTSCHMITT et al. 2016).

Der Feinanteil der KUP-Proben lag häufig unterhalb der Werte der Waldhackschnitzel (Tabelle 2). Dies lag neben einem hohen Nadelanteil bei den Waldrestholzproben vor allem an der Hackertechnik. KUP-Proben, die mit einem Feldhäcksler geerntet wurden, hatten häufig sehr niedrige Feinanteile (Mittel: 4,0 m-%, Max: 7,4 m-%, n = 8). Im Vergleich dazu hatten KUP-Hackschnitzel, die im abgesetzten Verfahren mit einem konventionellen Trommelhacker produziert wurden, mittlere Feinanteile von 7,1 m-% (Max: 14,0 m-%, n = 17).

Die Schüttdichte (auf wasserfreier Bezugsbasis) der KUP-Proben lag bei durchschnittlich 170 kg/m<sup>3</sup> und damit um ca. 30 bzw. 40 kg/m<sup>3</sup> niedriger als bei Energierundholz oder Waldrestholz. Dies lässt sich vor allem auf unterschiedliche Rohdichten der Holzarten zurückführen, wobei vor allem die Proben aus harten Laubhölzern (z. B. Buche, Eiche) der Referenzproben deutlich über den Werten von Pappel und Weide lagen (244 kg/m<sup>3</sup>, n = 9). Nadelholzproben lagen dagegen mit 195 kg/m<sup>3</sup> (n = 21) nur leicht höher als die Brennstoffe aus KUP.

Die Stickstoffgehalte (N) lagen in allen KUP-Proben unterhalb des Grenzwerts der DIN EN ISO 17225-4 von 1,0 m-% (Tabelle 2). Die Werte der Pappel waren im Mittel vergleichbar mit den Werten für Waldrestholz (DIETZ et al. 2016), die Stickstoffgehalte von Weide lagen i. d. R. darüber. Bei den Pappelproben der längeren Umtriebe (7 bis 10 Jahre) waren geringere Gehalte an Stickstoff im Brennstoff zu finden als bei den Proben aus dem kürzeren Umtrieb (0 bis 6 Jahre). Die Schwefelgehalte (S) lagen bei den untersuchten KUP-Sortimenten mit Pappel und Weide auf der Höhe der Vergleichsproben aus Waldrestholz, jedoch über den Proben aus Energierundholz (Tabelle 2, DIETZ et al. 2016). Im Mittel lagen die S-Gehalte bei der Weide etwas höher als bei Pappel und Waldrestholz. Der Grenzwert der DIN EN ISO 17225-4 von 0,1 m-% wurde aber in keiner der Proben überschritten.

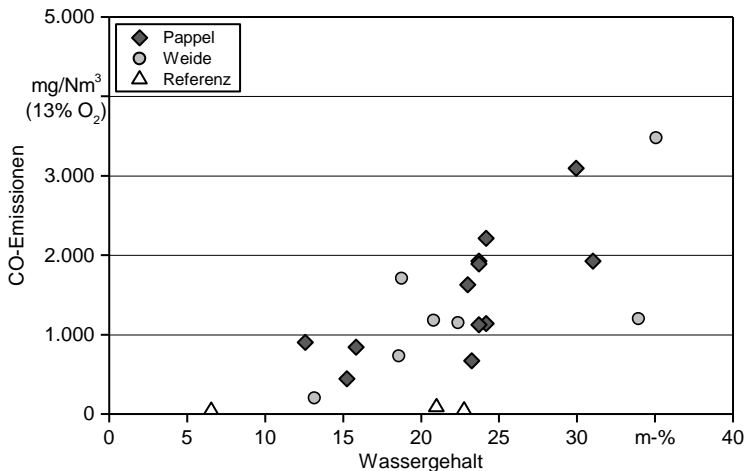
Hohe Gehalte an aerosolbildenden Elementen (Kalium, Natrium, Blei, Zink) wirken sich direkt auf die zu erwartenden Feinstaubemissionen bei der Verbrennung aus (vgl. Unterkapitel 5.4, SOMMERSACHER et al. 2013, BRUNNER et al. 2015, SCHÖN et al. 2017, MACK et al. 2018, ZENG et al. 2019). Sowohl Pappel als auch Weide zeigten deutlich erhöhte Gehalte an aerosolbildenden Elementen im Vergleich zu den Proben aus Waldrestholz und Energierundholz (DIETZ et al. 2016). Somit ist bei der Verbrennung von KUP-Hackschnitzeln mit zum Teil höheren Staubemissionen zu rechnen (vgl. Unterkapitel 5.4). Im Mittel waren die Gehalte an Aerosolbildnern bei Pappel und Weide etwa gleich hoch. Aufgetrennt nach einzelnen Elementen machte Kalium erwartungsgemäß den Großteil der aerosolbildenden Elemente aus (94,5 bis 98,5 m-%). Trotz insgesamt höherer Konzentrationen im Vergleich zu Waldrestholz und Energierundholz (Tabelle 2) entsprach diese Beobachtung der Verteilung aerosolbildender Elemente in naturbelassenem Holz (DIETZ et al. 2016). Die Elemente Natrium, Blei und Zink spielen mit maximal 4,5 m-% nur eine untergeordnete Rolle.

Die Ergebnisse zur Brennstoffqualität weisen darauf hin, dass es zu Problemen bei der Verbrennung kommen könnte, z. B. zu erhöhten Emissionen an Staub, Stickoxiden (NO<sub>x</sub>) oder zu der Bildung von Schlacke in der Brennkammer. Insgesamt konnten aber die Grenzwerte der aktuell gültigen internationalen Norm für Holzhackschnitzel, der DIN EN ISO 17225-4 (Spezifikation B1 und B2), jedoch eingehalten werden. Hackschnitzel aus KUP sind somit als naturbelassener Brennstoff einzuordnen.

### 7.3.2 Verbrennungsverhalten von KUP-Hackschnitzeln in einer 50 kW Kleinf Feuerungsanlagen

Am Feuerungsprüfstand des TFZ wurden zunächst Verbrennungsversuche mit einer 50 kW Kipprostfeuerung (HDG Compact 50) durchgeführt. Als Referenzbrennstoff kamen Hackschnitzel aus Sägerestholz und Waldrestholz, jeweils Nadelholz, zum Einsatz. Die Emissionen an CO, NO<sub>x</sub> und Gesamtstaub waren bei der Verbrennung von KUP-Hackschnitzeln i. d. R. deutlich höher als bei den Referenzbrennstoffen.

Hohe Emissionen an CO deuten immer auf eine unvollständige Verbrennung hin (KALTSCHMITT et al. 2016). Betrachtet man alle Verbrennungsversuche an der 50 kW-Feuerung, so zeigt sich eine Zunahme der CO-Emissionen mit steigendem Wassergehalt (Abbildung 2). Vor allem Wassergehalte, die den für den verwendeten Kessel maximal vom Hersteller zugelassenen Wert von 31 m-% überschreiten, führten zu deutlich erhöhten CO-Emissionen. Ein für den Kessel zu hoher Wassergehalt könnte dabei die Ursache für eine unvollständige Verbrennung sein (SCHÖN et al. 2017, KALTSCHMITT et al. 2016). Interessanterweise zeigten die Referenzproben aus Nadelholz bei gleichem Wassergehalt deutlich niedrigere Werte (39 bis 88 mg/Nm<sup>3</sup> bei 13 % O<sub>2</sub>) als die Hackschnitzel aus KUP (Abbildung 2). Somit kann der Wassergehalt nicht als die einzige wesentliche Bestimmungsgröße für die Höhe der CO-Emissionen angesehen werden.

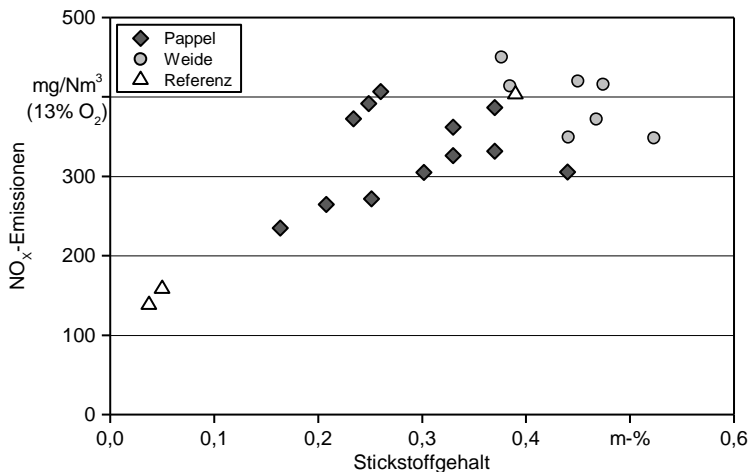


**Abb. 3.** CO-Emissionen in Abhängigkeit vom Wassergehalt bei der Verbrennung in einer 50 kW Kipprostfeuerung (HDG Compact 50)

Alle Versuche wurden bei Nennlast der Anlage (50 kW) durchgeführt. Dabei wurden die Einstellungen des Kessels (Primärluft, Lambda) auf Brennstoffe aus Sägerestholz hin optimiert (SCHÖN et al. 2017). Um dieselbe Leistung mit Brennstoffen aus KUP zu erreichen, die i. d. R. deutlich geringere Energiedichten aufweisen (niedrigere Schüttdichte, niedriger Heizwert, siehe Abschnitt 5.2.1), muss der Anlage mehr Brennstoff zugeführt werden. Dadurch könnte es je nach Kessel zur Überfüllung des Brennraums kommen, d. h., es befindet sich zu viel Brennstoff auf einmal in der Feuerung (KALTSCHMITT et al. 2016). Dies war vermutlich auch in den hier dargestellten Versuchen der Fall. Abhilfe könnte eine gezielte Einstellung des Kessels auf KUP-Brennstoffe ermöglichen. Ebenso könnte eine Lastabsenkung bei der Nutzung von KUP eine Verbesserung hinsichtlich der CO-Emissionen bewirken.

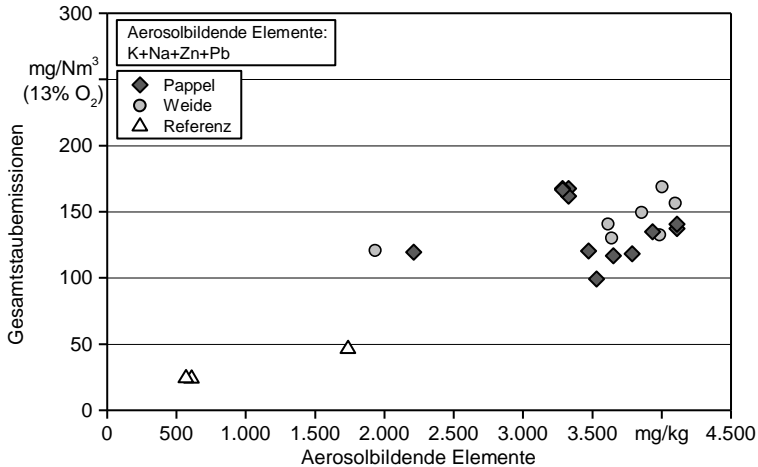


Im Fall von  $\text{NO}_x$  sind die gemessenen Emissionen direkt auf den Stickstoffgehalt im Brennstoff zurückzuführen (Abbildung 3). Eine Verringerung des Gehalts an N durch Siebung führte dementsprechend zu einer Verringerung an  $\text{NO}_x$  (SOMMERSACHER et al. 2013, BRUNNER et al. 2015). Analog führte eine Absiebung von Nadeln aus Waldrestholzhackschnitzeln im Projekt „qualiS“ ebenfalls zu einer Reduzierung des Stickstoffgehalts und zu geringeren  $\text{NO}_x$ -Emissionen bei einer 30 kW-Feuerung (ZENG et al. 2019).



**Abb. 4.** Stickoxidemissionen in Abhängigkeit vom Stickstoffgehalt des Brennstoffs bei der Verbrennung in einer 50 kW Kipprostfeuerung (HDG Compact 50)

Die Emissionen an Gesamtstaub waren direkt abhängig vom Gehalt an aerosolbildenden Elementen im Brennstoff, von denen das Kalium den Hauptanteil ausmachte (Abbildung 4, Tabelle 2). Folglich verringert sich bei einer Siebung der Brennstoffe häufig zusammen mit dem Anteil an aerosolbildenden Elementen auch die Staubemission (ZENG et al. 2019).



**Abb. 5.** Gesamtstaubemissionen in Abhängigkeit vom Gehalt der aerosolbildenden Elemente (auf wasserfreier Bezugsbasis) bei der Verbrennung in einer 50 kW Kippstoveuerung (HDG Compact 50)

Gesamtstaubemissionen können auch aufgrund einer unvollständigen Verbrennung erhöht sein (KALTSCHMITT et al. 2016). Dabei bilden sich vornehmlich Rußpartikel. Folglich nahm analog zu den Emissionen an CO auch der Gesamtstaub bei höheren Wassergehalten in der 50 kW Kippstoveuerung zu. Den größten Effekt auf die Rußbildung dürfte dabei aber eine zu hohe Brennraumbelastung des Kessels unter Vollast haben. Wie schon beim CO diskutiert, könnte es durch eine Überlastung des Kessels aufgrund der geringeren Energiedichte von KUP zu einer unvollständigen Verbrennung gekommen sein. Somit könnte sich auch beim Gesamtstaub eine andere Kesselführung, aber auch ein Teillastbetrieb positiv auf das Verbrennungsverhalten von KUP-Brennstoffen auswirken (siehe oben).

Kritisch zu bewerten ist, dass in keinem Fall bei den Versuchen mit KUP-Hackschnitzeln die Emissionsgrenzwerte der 2. Stufe der 1. BImSchV (CO: 400 mg/Nm<sup>3</sup>, Staub: 20 mg/Nm<sup>3</sup>, jeweils bei 13 % O<sub>2</sub>) mit der hier verwendeten Feuerung annähernd eingehalten werden konnte. Dies konnte mit den gewählten Einstellungen, aber auch bei der Verwendung von Hackschnitzeln aus Waldrestholz nicht gewährleistet werden.

### 7.3.3 Verbrennungsverhalten von Pellets und Hackschnitzel aus Pappel in einem 30 kW Biomassekessel

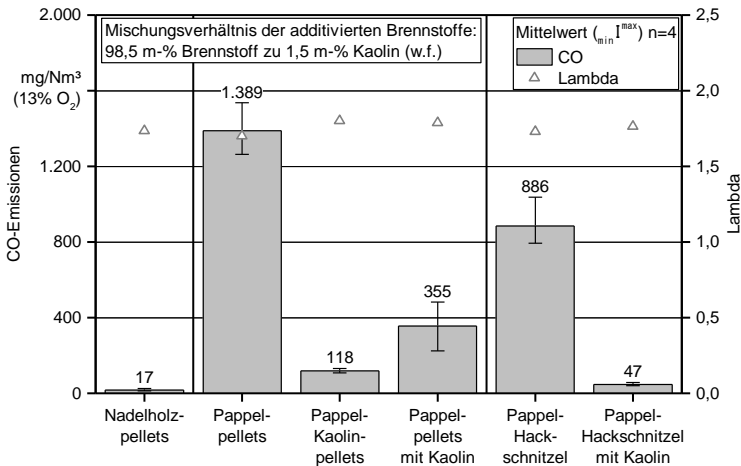
In einer zweiten Versuchsreihe wurden sowohl Pellets als auch Hackschnitzel aus Pappel in einer 30 kW Treppenstoveuerung (Guntamatic Powerchip 20/30) am Feuerungsprüfstand des TFZ verbrannt (MACK et al. 2018). Zum Einsatz kamen dabei auch Pappel-Brennstoffe, die mit Kaolin (1,5 m-%) additiviert wurden. Als Referenz wurden ENplus-Pellets (Qualität A1) aus Nadelholz verwendet.

Die am TFZ produzierten Pellets aus Pappel (7-jähriger Umtrieb) zeigten in vielen Fällen typische Werte für Holzpellets auf. Ihr Wassergehalt lag bei zwischen 8,4 und 8,6 m-%, ihre Schüttdichte zwischen 690 und 700 kg/m<sup>3</sup> und ihre mechanische Festigkeit zwischen 98 und 99 m-%. Der Heizwert lag bei einem für Pappel typischen Wert von 18,4 MJ/kg. Der Aschegehalt der reinen Pappelpellets lag bei 2,3 m-% (wasserfrei), der Aschegehalt der mit 1,5 % Kaolin additivierten Pellets bei 3,1 m-% (wasserfrei). Somit konnten sowohl die reinen

als auch die additivierten Pellets aufgrund des Aschegehalts nicht nach DIN EN ISO 17225-2 oder nach ENplus eingeordnet werden. Die Gehalte an aerosolbildenden Elemente in den Pellets beliefen sich auf 3130 bis 3260 mg/kg. Die Stickstoffgehalte lagen in beiden Varianten bei ca. 0,3 m-% (MACK et al. 2018).

Analog der Versuche mit der 50 kW-Feuerung verursachte die Verbrennung von Pappelbrennstoffen hohe CO-Emissionen in dem 30 kW-Kessel. Reine Pappelpellets verursachten CO-Emissionen von durchschnittlich 1.389 mg/Nm<sup>3</sup> (siehe Abbildung 5). Diese lagen deutlich über dem Grenzwert von 400 mg/Nm<sup>3</sup> der 1. BImSchV. Durch die Additivierung vor der Pelletierung mit 1,5 m-% Kaolin ließen sich die CO-Emissionen auf 118 mg/Nm<sup>3</sup> und damit um 92 % reduzieren. Die Zugabe der 1,5 m-% Kaolin nach dem Pelletieren führte mit 355 mg/Nm<sup>3</sup> ebenfalls zu einer deutlichen Reduzierung der CO-Emissionen um rund 74 % und somit zur Einhaltung der Grenzwerte für CO.

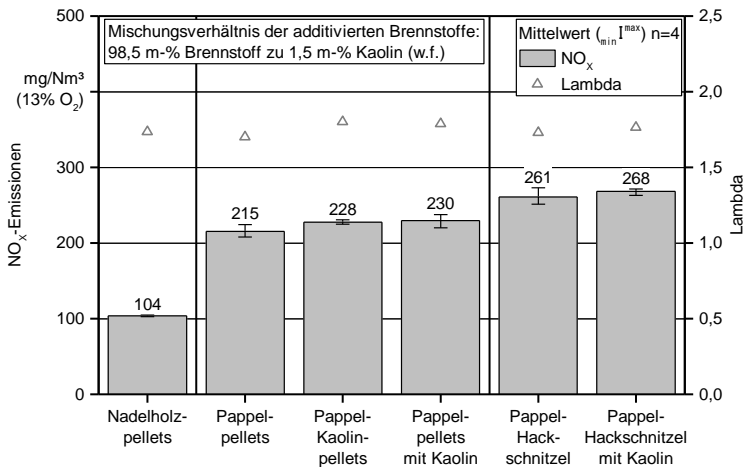
Bei der Verbrennung der Pappelhackschnitzel betragen die CO-Emissionen 886 mg/Nm<sup>3</sup>. Sie lagen somit unter den Werten der reinen Pappelpellets. Eine mögliche Erklärung hierfür wäre, dass der Guntamatic PowerChip 20/30 als Hackschnitzelkessel auf diese Brennstoffform optimiert ist. Durch die Zugabe der ca. 1,5 m-% Kaolin über die Schnecke der Brennstoffzufuhr reduzierten sich auch bei Hackschnitzeln die CO-Emissionen auf 47 mg/Nm<sup>3</sup> und damit um 95 % verglichen mit den reinen Pappelbrennstoffen. Somit konnten die CO-Emissionen durch Additivierung vor der Pelletierung und durch einfache Zugabe von 1,5 m-% Kaolin vor der Verbrennung unter den Grenzwert von 400 mg/Nm<sup>3</sup> (Stufe 2 der 1. BImSchV) verringert werden.



**Abb. 6.** CO-Emissionen von Pappelbrennstoffen bei der Verbrennung in einer 30 kW Treppenrostfeuerung (Guntamatic Powerchip 20/30)

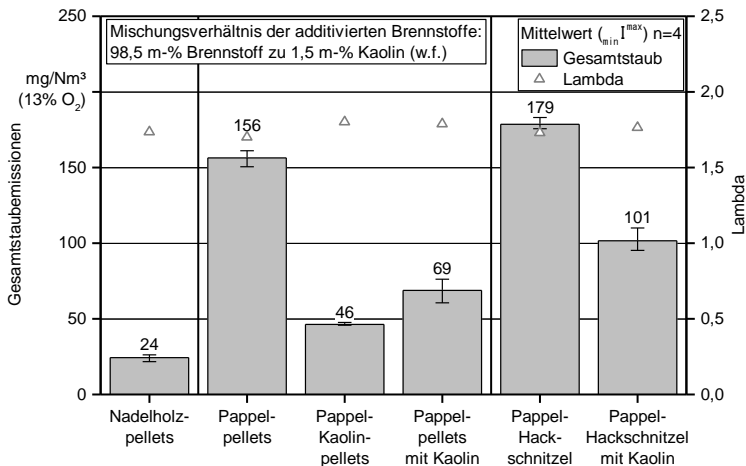
Der Grund für diese drastische CO reduzierende Wirkung des Kaolins ist noch nicht abschließend geklärt. Ähnliche Beobachtungen wurden schon von anderen Forschern beschrieben (Tofbrenner, Getreidefeuerung, bewegter Treppenrost, siehe BÄFVER et al. 2009, BRUNNER et al. 2015, XIONG et al. 2008, MACK et al. 2018). Eine mögliche Erklärung könnte ein katalytischer Effekt des Kaolins sein (HERAVI et al. 2008, KOCI et al. 2011). Eine weitere denkbare Erklärung wäre möglicherweise der positive Effekt des Kaolins auf die Glutbettstruktur durch verringerte Schlackebildung (Porosität).

Bei der Verbrennung reiner Papppellets wurden 215 mg/Nm<sup>3</sup> NO<sub>x</sub> emittiert, während für die Hackschnitzel aus dem gleichen Pappelmaterial mit 261 mg/Nm<sup>3</sup> höhere Emissionen aufwiesen. Eine mögliche Erklärung hierfür könnte die bei Hackschnitzeln höhere Brennraumbelastung, also das im Brennraum befindliche Brennstoffvolumen im Verhältnis zum Brennraumvolumen sein (KALTSCHMITT ET AL. 2016). Für Papppellets (Abbildung 6) steigen die NO<sub>x</sub>-Emissionen durch die Zugabe von 1,5 m-% Kaolin zur Pelletierung minimal um 13 mg/Nm<sup>3</sup> und um 15 mg/Nm<sup>3</sup>, wenn das Kaolin nach der Pelletierung zugesetzt wird. Im Gegensatz dazu werden beim Einsatz von Nadelholzpellets lediglich 104 mg/Nm<sup>3</sup> freigesetzt.



**Abb. 7.** NO<sub>x</sub>-Emissionen von Pappelbrennstoffen bei der Verbrennung in einer 30 kW Treppenrostfeuerung (Guntamatic Powerchip 20/30)

Die Gesamtstaubemissionen der reinen Papppellets lagen mit 156 mg/Nm<sup>3</sup> auf einem hohen Niveau und entsprachen dem 6,5-fachen Wert der Holzpellets. Bei der Additivierung mit anschließender Pelletierung ließen sich die Gesamtstaubemissionen auf 46 mg/Nm<sup>3</sup> und damit um ca. 71 % reduzieren (Abbildung 7). Durch die nachträgliche Additivierung der Papppellets betragen die Gesamtstaubemissionen 69 mg/Nm<sup>3</sup> und lagen immer noch ca. 56 % niedriger als bei reinen Papppellets. Bei der Verwendung purer Pappelhackschnitzel lagen die Gesamtstaubemissionen bei 179 mg/Nm<sup>3</sup>. Dabei fiel auf, dass die Gesamtstaubemissionen der Pappelhackschnitzel signifikant höher ausfielen als bei der Verbrennung der reinen Papppellets. Durch die Zugabe von 1,5 m-% Kaolin über die Brennstoffförderschnecke konnten die Gesamtstaubemissionen auf 101 mg/Nm<sup>3</sup> gesenkt werden.



**Abb. 8.** Gesamtstaubemissionen von Pappelbrennstoffen bei der Verbrennung in einer 30 kW Treppenrostfeuerung (Guntamatic Powerchip 20/30)

Als Gründe für die Verringerung der Emissionen an Gesamtstaub ist vor allem die Fixierung des aerosolbildenden Elements Kalium durch das Additiv in die Asche zu sehen (HÜLSMANN et al. 2018, MACK et al. 2018). Die Additivierung der Brennstoffe mit Tonmineralen stellt somit eine gute Möglichkeit dar, das Emissionsverhalten von KUP-Brennstoffen deutlich zu verbessern. Insgesamt lagen dennoch alle Gesamtstaubemissionen oberhalb des Grenzwertes der 1. BImSchV von 20 mg/Nm<sup>3</sup>. Demnach müsste z. B. zusätzlich ein Elektroabscheider nachgerüstet werden. Hinsichtlich der gasförmigen Emissionen sowie einer Entlastung des Elektroabscheiders bei derartig hohen Staubkonzentrationen wäre eine Kombination aus Additivierung und Elektroabscheider aber dennoch ein denkbarer Lösungsansatz, um Brennstoffe wie Pappel aus dem Kurzumtrieb in Kleinf Feuerungsanlagen sicher nutzen zu können.

## 7.4 Schlussfolgerung

Insgesamt zeigt sich, dass Brennstoffe aus dem Kurzumtrieb in Kleinf Feuerungsanlagen als anspruchsvoller Brennstoff einzuordnen ist. Eine Trocknung auf den passenden Wassergehalt ist prinzipiell erforderlich. Ebenso sollte der Kesselbetrieb auf den Brennstoff gezielt eingestellt werden.

Die Einhaltung strenger Emissionsgrenzwerte bleibt aber eine Herausforderung, wenn nicht gleichzeitig auf eine moderne Anlagentechnik mit Staubminderungsmaßnahmen zurückgegriffen wird. Hier ist die Verwendung von elektrostatischen Staubabscheidern zu empfehlen. Moderne, sich teilweise noch in der Entwicklung befindliche primärseitige Neuerungen, z. B. Hackschnitzelkessel mit konsequenter Vorvergassung oder mit Brennwerttechnik, könnten hier ebenfalls Abhilfe schaffen. Generell erweisen sich KUP-Brennstoffe allerdings v. a. für größere Heizwerke bei entsprechendem Wassergehalt geeignet, da hier die notwendigen technischen Maßnahmen zur Luftreinhaltung leichter wirtschaftlich darstellbar sind.

## **Danksagung**

Die Studien wurden über das Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (StMELF) und über das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) finanziert. Sie fanden häufig in enger Zusammenarbeit mit der Abteilung „Forsttechnik, Betriebswirtschaft, Holz“ der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) statt. Die Ergebnisse wurden bereits teilweise als TFZ-Bericht Nr. 56 veröffentlicht (Download unter [www.tfz.bayern.de](http://www.tfz.bayern.de)).

## Quellen

- BÄFVER, L. S., et al (2009).: Particle emission from combustion of oat grain and its potential reduction by addition of limestone or kaolin. *Fuel Processing Technology* 90(3), S. 353–359
- BRUNNER T, et al. (2015).: Additivition Guideline - How to Utilise Inorganic Additives as a Measure to Improve Combustion Related Properties of Agricultural Biomass Fuels: ETA-Florence Renewable Energies; 2015.
- DIETZ, E., et al. (2016).: Berichte aus dem TFZ Nr. 46 –Qualität von Holzhackschnitzeln in Bayern, Technologie- und Förderzentrum, 141 Seiten
- HERAVI, M. M. et al. (2008): Kaolin. A recyclable catalyst for the synthesis of 1,5-benzodiazepines. *Heteroatom chemistry* 19(2), S. 215-217
- HUELSMANN T, et al.(2018).: Influence of kaolinite on the PM emissions from small-scale combustion. *Biomass Conversion and Biorefinery*, Online First, 16 Seiten
- KALTSCHNITT, M, et al. (2016).: Energie aus Biomasse. Grundlagen, Technik und Verfahren. Springer, 1755 Seiten
- KOČÍ K, et al. (2011): Comparison of the pure TiO<sub>2</sub> and kaolinite/TiO<sub>2</sub> composite as catalyst for CO<sub>2</sub> photocatalytic reduction. *Catalysis Today* 161(1), S. 105–9
- KUPTZ, D., et al. (2018).: Berichte aus dem TFZ Nr. 56 – Holzhackschnitzel aus dem Kurzumtrieb), Technologie- und Förderzentrum, 163 Seiten
- KUPTZ, D. & HARTMANN, H. (2015).: The effect of raw material and machine setting on chipping performance and fuel quality – a German case study. *International Journal of Forest Engineering* 26:1, S. 60-70
- MACK, R. et al. (2018).: Combustion behaviour and slagging tendencies of kaolin additivated agricultural pellets and of wood-straw pellet blends in a small scale boiler. *Tagungsbandbeitrag zur EU BC&E 2018*, S. 408-417
- SCHÖN, C. et al. (2017).: Influence of wood chip quality on emission behavior in small-scale wood chip boilers. *Biomass Conversion and Biorefinery*, Online First, 14 Seiten
- SOMMERSACHER, P., et al. (2013).: Application of novel and advanced fuel characterization tools for the combustion related characterization of different wood/kaolin and straw/kaolin mixtures. *Energy & Fuels*, Jg. 27, Nr. 9, S. 5192-5206
- XIONG, S., et al. (2008).: Slagging Characteristics during combustion of corn stovers with and without kaolin and calcite. *Energy & Fuels* 22(5), S. 3465–3470
- ZENG, T., et a. (2019).: Impact of adhering soil and other extraneous impurities on the combustion and emission behavior of forest residue wood chips in an automatically stoked small-scale boiler. *Biomass Conversion and Biorefinery*, Online First, 18 Seite