

66

Berichte aus dem TFZ

# **Einflussfaktoren auf die NO<sub>x</sub>-Emissionen in Hackschnitzel- heizwerken zwischen 1 und 5 Megawatt**

Projektpartner:

Bayerisches Landesamt für  
Umwelt





# **Einflussfaktoren auf die NO<sub>x</sub>-Emissionen in Hackschnitzelheizwerken zwischen 1 und 5 Megawatt**





# **Einflussfaktoren auf die NO<sub>x</sub>- Emissionen in Hackschnitzel- heizwerken zwischen 1 und 5 Megawatt**

Claudia Schön  
Paul Roßmann  
Peter Turowski  
Hans Hartmann  
Gerhard Schmoeckel

Projektpartner:

Bayerisches Landesamt für  
Umwelt



**Berichte aus dem TFZ 66**

**Straubing, März 2020**

**Titel:** Einflussfaktoren auf die NO<sub>x</sub>-Emissionen in Hackschnitzelheizwerken zwischen 1 und 5 Megawatt

**Autoren:** Claudia Schön, Paul Roßmann, Peter Turowski, Hans Hartmann, Gerhard Schmoeckel

**Projektleitung:** Claudia Schön

**Weitere Mitarbeit:** Albert Maierhofer, Stephan Winter-Thoma, Anja Rocktäschel, Elisabeth Rist

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bayerischen Landesamtes für Umwelt gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

© 2020  
Technologie- und Förderzentrum  
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), Straubing

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

Unter Verwendung mineralölfreier Druckfarben (Mineralölanteil < 1 %) gedruckt auf chlorfreiem Papier aus nachhaltiger, zertifizierter Waldbewirtschaftung.

**ISSN:** 1614-1008

**Hrsg.:** Technologie- und Förderzentrum  
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ)  
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:** Claudia Schön, Anna Grundner, Ulrich Eidenschink

**Verlag:** Eigenverlag

**Erscheinungsort:** Straubing

**Erscheinungsjahr:** 2020

**Gestaltung:** Claudia Schön

**Fotonachweis:** Claudia Schön, Roßmann, Feldanlagenbetreiber

# Inhaltsverzeichnis

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Abbildungsverzeichnis .....</b>   | <b>7</b>  |
| <b>Tabellenverzeichnis.....</b>  | <b>11</b> |
| <b>1 Einleitung und Ziele .....</b>  | <b>13</b> |
| <b>2 Material und Methoden .....</b>   | <b>15</b> |
| 2.1 Brennstoffsortimente und Brennstoffanalysen .....                              | 15        |
| 2.2 Messtechnik zur Emissionsüberwachung .....                                     | 16        |
| 2.3 TFZ-Heizwerk .....   | 18        |
| 2.4 Weitere Hackschnitzelheizwerke .....   | 19        |
| 2.4.1 Feldanlage 1 .....   | 19        |
| 2.4.2 Feldanlage 2 .....   | 20        |
| <b>3 Ergebnisse .....</b>  | <b>25</b> |
| 3.1 Brennstoffsortimente für das TFZ-Heizwerk.....                                 | 25        |
| 3.2 Brennstoffanalysen für die Hackschnitzelsortimente des TFZ-<br>Heizwerks ..... | 25        |
| 3.2.1 Wassergehalt, Aschegehalt, Heizwert, Feingehalt und Schüttdichte.....        | 25        |
| 3.2.2 Elementarzusammensetzung.....  | 31        |
| 3.2.3 Brennstoffeigenschaften bei den Feldanlagen .....                            | 34        |
| 3.3 Emissionsverhalten des TFZ-Heizwerks .....                                     | 35        |
| 3.3.1 Stickstoffoxidemissionen.....  | 35        |
| 3.3.2 Kohlenmonoxidemissionen .....  | 42        |
| 3.3.3 Schwefeldioxidemissionen .....   | 45        |
| 3.3.4 Gesamtstaubemissionen.....   | 46        |
| 3.4 Emissionsverhalten bei der Feldanlage 1 .....                                  | 48        |
| 3.5 Emissionsverhalten bei der Feldanlage 2 .....                                  | 49        |
| <b>Zusammenfassung .....</b>   | <b>51</b> |
| <b>Abstract/Summary .....</b>  | <b>53</b> |
| <b>Quellenverzeichnis .....</b>  | <b>55</b> |
| <b>Anhang .....</b>  | <b>57</b> |





## Abbildungsverzeichnis

|               |   |    |
|---------------|---|----|
| Abbildung 1:  | Probenahme der Hackschnitzel während des Entladevorgangs.....   | 15 |
| Abbildung 2:  | Anordnung der Messausrüstung während der Emissionsmessungen am TFZ-Heizwerk.....  | 17 |
| Abbildung 3:  | Anlieferung von Holzhackschnitzeln im Lkw direkt in den Bunker (links) und Heizkessel des TFZ-Heizwerks mit Aschecontainern im Vordergrund (rechts) .....           | 18 |
| Abbildung 4:  | Funktionsprinzip eines Kessels am TFZ-Heizwerk, angepasst [12].....   | 19 |
| Abbildung 5:  | Links: Feldanlage 1 nutzt als Brennstoff Sägespäne (Quelle: TFZ), rechts: das Funktionsprinzip (Quelle: Feldanlagenbetreiber 1).....                                | 20 |
| Abbildung 6:  | Feldanlage 1 mit dem Lambion-Kessel (links) und den Zyklonen sowie der Messanordnung während der Feldmessungen (rechts) .....                                       | 20 |
| Abbildung 7:  | Überdachte Brennstofflagerung bei der Feldanlage 2 mit hellen und dunklen Hackschnitzeln unterschiedlicher Qualität.....  | 21 |
| Abbildung 8:  | Kessel- und Wärmetauschereinheit der Feldanlage 2 (links) und Messaufbau während der Feldmessungen (rechts).....  | 22 |
| Abbildung 9:  | Funktionsprinzip der Feldanlage 2 mit Brennstoffzufuhr, Kesseleinheit und Abgasführung (Quelle: Feldanlagenbetreiber 2).....  | 23 |
| Abbildung 10: | Wassergehalt aller im Messzeitraum gelieferten Hackschnitzelsortimente für das TFZ-Heizwerk im Anlieferungszustand.....   | 26 |
| Abbildung 11: | Aschegehalt aller im Messzeitraum gelieferten Hackschnitzelsortimente für das TFZ-Heizwerk, bezogen auf die Trockenmasse.....                                       | 27 |
| Abbildung 12: | Heizwert aller im Messzeitraum gelieferten Hackschnitzelsortimente für das TFZ-Heizwerk, bezogen auf die Trockenmasse .....   | 28 |
| Abbildung 13: | Korrelation zwischen Heizwert und Aschegehalt, jeweils bezogen auf die Trockenmasse .....   | 29 |
| Abbildung 14: | Feinanteil aller im Messzeitraum gelieferten Hackschnitzelsortimente für das TFZ-Heizwerk.....  | 30 |
| Abbildung 15: | Aschegehalt in Abhängigkeit vom Feinanteil für alle im Messzeitraum gelieferten Hackschnitzelsortimente für das TFZ-Heizwerk.....                                   | 30 |
| Abbildung 16: | Schüttdichte ohne Schrumpfung für alle im Messzeitraum gelieferten Hackschnitzelsortimente für das TFZ-Heizwerk .....   | 31 |
| Abbildung 17: | Stickstoffgehalt für alle im Messzeitraum gelieferten Hackschnitzelsortimente für das TFZ-Heizwerk, bezogen auf die Trockenmasse.....                               | 32 |
| Abbildung 18: | Zusammenhang zwischen Stickstoffgehalt im Brennstoff bezogen auf die Trockenmasse und Feinanteil für alle im Messzeitraum gelieferten Hackschnitzelsortimente ..... | 33 |

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 19: Summe der Aerosolbildner Kalium und Natrium aller im Messzeitraum gelieferten Hackschnitzelsortimente für das TFZ-Heizwerk, bezogen auf die Trockenmasse .....   | 34 |
| Abbildung 20: Zeitlicher Verlauf der Stickstoffoxidemissionen und der Kesselauslastung von Oktober bis Mitte Dezember 2018 am TFZ-Heizwerk (Grenzwert: 44. BlmSchV: 370 mg/Nm <sup>3</sup> bei 6 % O <sub>2</sub> ) .....  | 36 |
| Abbildung 21: NO <sub>x</sub> -Emissionen in Abhängigkeit vom Stickstoffgehalt des Brennstoffs (bezogen auf die Trockenmasse) bei verschiedenen Kesselauslastungen am TFZ-Heizwerk in 2018 (Grenzwert: 44. BlmSchV: 370 mg/Nm <sup>3</sup> bei 6 % O <sub>2</sub> ) .....                          | 37 |
| Abbildung 22: Zeitlicher Verlauf der Stickstoffoxidemissionen und der Kesselauslastung von Januar bis Mitte April 2019 am TFZ-Heizwerk (Grenzwert: 44. BlmSchV: 370 mg/Nm <sup>3</sup> bei 6 % O <sub>2</sub> ).....   | 38 |
| Abbildung 23: NO <sub>x</sub> -Emissionen in Abhängigkeit vom Stickstoffgehalt des Brennstoffs (bezogen auf die Trockenmasse) bei verschiedenen Kesselauslastungen am TFZ-Heizwerk in 2019 (Grenzwert: 44. BlmSchV: 370 mg/Nm <sup>3</sup> bei 6 % O <sub>2</sub> ) .....                          | 39 |
| Abbildung 24: NO <sub>x</sub> -Emissionen für die verschiedenen Brennstofflieferungen für das TFZ-Heizwerk. Für die meisten Lieferungen wurden bei verschiedenen Leistungen die NO <sub>x</sub> -Emissionen bestimmt (Grenzwert: 44. BlmSchV: 370 mg/Nm <sup>3</sup> bei 6 % O <sub>2</sub> )..... | 40 |
| Abbildung 25: Abhängigkeit der Stickstoffoxidemissionen vom Stickstoffgehalt aller Brennstoffe (bezogen auf die Trockenmasse) bei unterschiedlichen Kesselauslastungen am TFZ-Heizwerk (Grenzwert: 44. BlmSchV: 370 mg/Nm <sup>3</sup> bei 6 % O <sub>2</sub> ).....                               | 41 |
| Abbildung 26: Restsauerstoffgehalt im Abgas in Abhängigkeit vom Brennstoffwassergehalt und von der Kesselauslastung am TFZ-Heizwerk.....   | 42 |
| Abbildung 27: CO-Emissionen für die verschiedenen Hackschnitzellieferungen am TFZ-Heizwerk (CO-Grenzwert: 44. BlmSchV: 220 mg/Nm <sup>3</sup> bei 6 % O <sub>2</sub> )   | 43 |
| Abbildung 28: CO-Emissionen in Abhängigkeit vom Brennstoffwassergehalt und von der Kesselauslastung am TFZ-Heizwerk (Grenzwert: 44. BlmSchV: 220 mg/Nm <sup>3</sup> bei 6 % O <sub>2</sub> ).....  | 44 |
| Abbildung 29: CO-Emissionen in Abhängigkeit von den NO <sub>x</sub> -Emissionen am TFZ-Heizwerk.....   | 45 |
| Abbildung 30: SO <sub>2</sub> -Emissionen in Abhängigkeit vom Schwefelgehalt im Brennstoff für ausgewählte Hackschnitzelsortimente für das TFZ-Heizwerk.....   | 46 |
| Abbildung 31: Gesamtstaubemissionen für ausgewählte Hackschnitzellieferungen am TFZ-Heizwerk .....   | 47 |
| Abbildung 32: Abhängigkeit der Gesamtstaubemissionen von den Aerosolbildnern Kalium und Natrium (bezogen auf Trockenmasse) am TFZ-Heizwerk...  | 48 |
| Abbildung 33: Zeitlicher Verlauf der CO- und NO <sub>x</sub> -Emissionen an Feldanlage 1 über zwei Messtage (NO <sub>x</sub> -Grenzwert: 44. BlmSchV: 370 mg/Nm <sup>3</sup> bei 6 % O <sub>2</sub> ).....   | 49 |

---

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 34: Zeitlicher Verlauf der CO- und NO <sub>x</sub> -Emissionen an Feldanlage 2 über einen Messtag (NO <sub>x</sub> -Grenzwert: 44. BImSchV: 370 mg/Nm <sup>3</sup> bei 6 % O <sub>2</sub> )..... | 50 |
|--|----|



## Tabellenverzeichnis

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Tabelle 1:  | Emissionsgrenzwerte für naturbelassenes Holz in Feuerungen < 5 MW nach TA Luft, MCP-Richtlinie und 44. BImSchV, jeweils bezogen (umgerechnet) auf 6 % Sauerstoffgehalt [6] [7] [8].....   | 13 |
| Tabelle 2:  | Relevante physikalische Qualitätsparameter und deren Einfluss auf die Verbrennung nach Prüfnorm .....   | 16 |
| Tabelle 3:  | Brennstoffeigenschaften bei den untersuchten Feldanlagen (ar – im Anlieferungszustand, d – bezogen auf die Trockenmasse) .....  | 35 |
| Tabelle 4:  | Hauptelemente der Brennstoffe der Feldanlagen, jeweils bezogen auf die Trockenmasse .....   | 35 |
| Tabelle 5:  | Übersicht der Hackschnitzzellieferungen für das TFZ-Heizwerk mit Lieferdatum, Sortiment, Lieferant, Liefermenge im Anlieferungszustand (ar) und Bemerkungen zu den Hackschnitzeln (Erh – Energierundholz, Wrh – Waldrestholz, KUP – Kurzumtrieb, LPM – Landschaftspflegematerial) ..... | 57 |
| Tabelle 6:  | Bilder der Hackschnitzel aller Lieferungen ans TFZ (Erh – Energierundholz, Wrh – Waldrestholz, KUP – Kurzumtrieb, LPM – Landschaftspflegematerial) .....  | 58 |
| Tabelle 7:  | Parameter zur Charakterisierung der Hackschnitzzellieferungen, wie Wassergehalt im Anlieferungszustand (ar), Aschegehalt, Heizwert, Schüttdichte (ohne Schrumpfung), jeweils wasserfrei (d) und Feingehalt .....  | 61 |
| Tabelle 8:  | Korngrößenverteilung der gelieferten Hackschnitzelsortimente, jeweils in Masseprozent im lufttrockenen Zustand .....  | 62 |
| Tabelle 9:  | Hauptelemente der gelieferten Hackschnitzelsortimente für das TFZ-Heizwerk, jeweils bezogen auf die Trockenmasse (n. b. – nicht bestimmt) .....   | 63 |
| Tabelle 10: | Weitere Hauptelemente der Hackschnitzelsortimente für das TFZ-Heizwerk, jeweils bezogen auf die Trockenmasse .....  | 64 |



# 1 Einleitung und Ziele

Die Überführung der MCP-Richtlinie (EU) (2015/2193) in deutsches Recht im Rahmen der 44. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes wurde zum 20.06.2019 abgeschlossen. Hierin sind Emissionsgrenzwerte für mittelgroße Feuerungsanlagen zwischen 1 MW und 50 MW für Kohlenmonoxid, Stickstoffoxide, Schwefeloxide und Gesamtstaub festgelegt. Herausgehobenes Ziel der Richtlinie ist es, die anlagenbedingten Stickstoffoxid-Emissionen zu senken, wobei nicht nur für neu zu errichtende, sondern auch für bestehende Biomasseheizwerke verstärkte Anstrengungen zur Senkung der NO<sub>x</sub>-Emissionen erforderlich sind. Insbesondere für bestehende Holzfeuerungsanlagen im Bereich von 1 MW bis 5 MW Feuerungswärmeleistung bestehen größere Kenntnislücken über die Abhängigkeit des NO<sub>x</sub>-Ausstoßes von der aktuellen Brennstoffbeschaffenheit und die realen Emissionen im Langzeitbetrieb. Neben dem Brennstoffeinfluss ist hierbei außerdem ein erheblicher Einfluss der in der Praxis eingesetzten Feuerungsanlagentechnik (d. h. Feuerungskonstruktion) sowie der jeweiligen Betriebseinstellung zu vermuten. Die in der Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft [1]) aus dem Jahr 2002 enthaltenen Emissionsgrenzwerte für Kohlenmonoxid von 150 mg/Nm<sup>3</sup>, Stickstoffoxide von 220 mg/Nm<sup>3</sup> und Gesamtstaub von 100 mg/Nm<sup>3</sup>, jeweils bezogen auf 11 % O<sub>2</sub> für Anlagen bis 2,5 MW Feuerungswärmeleistung, werden nach Inkrafttreten der 44. BImSchV durch unmerklich strengere Grenzwerte ersetzt, wie Tabelle 1 zu entnehmen ist.

*Tabelle 1: Emissionsgrenzwerte für naturbelassenes Holz in Feuerungen < 5 MW nach TA Luft, MCP-Richtlinie und 44. BImSchV, jeweils bezogen (umgerechnet) auf 6 % Sauerstoffgehalt [1] [3] [5]*

|                                       | TA-Luft              | MCP-Richtlinie |                    | 44. BImSchV |                                    |
|---------------------------------------|----------------------|----------------|--------------------|-------------|------------------------------------|
| Inkrafttreten                         | 01.10.2002           | 25.11.2015     |                    | 20.06.2019  |                                    |
|                                       |                      | Neuanlagen     | bestehende Anlagen | Neuanlagen  | bestehende Anlagen <sup>1,2)</sup> |
| CO (mg/Nm <sup>3</sup> )              | 225                  | –              | –                  | 220         | 220                                |
| NO <sub>x</sub> (mg/Nm <sup>3</sup> ) | 375                  | 500            | 650                | 370         | 370                                |
| Gesamtstaub (mg/Nm <sup>3</sup> )     | 75/150 <sup>4)</sup> | 50             | 50                 | 35          | 35/50 <sup>3)</sup>                |

<sup>1)</sup> Bis 31.12.27 gilt TA Luft 2002, danach gelten diese Anforderungen.

<sup>2)</sup> Anforderungen gelten nicht nur bei Betrieb mit Nennlast.

<sup>3)</sup> Bei Anlagen, die bei Inkrafttreten bereits mit einem filternden oder elektrostatischen Abscheider ausgestattet sind.

<sup>4)</sup> Bei zwei Zahlenangaben: 2,5 bis 5 MW bzw. < 2,5 MW Feuerungswärmeleistung.

Ziel des Untersuchungsprogramms war es, Zusammenhänge zwischen der Emission an Stickstoffoxiden im Abgas und dem Stickstoffgehalt im Brennstoff, der Kesselleistung und der Anlagentechnik zu ermitteln, um mit Blick auf die Grenzwerteinhaltung im praktischen Betrieb Grundlagen für die Verhandlungen zwischen Betreibern, Anlagenherstellern und Genehmigungsbehörden zu schaffen. Dabei sollten für bestehende Anlagen einerseits die Bandbreite der einsetzbaren Brennstoffqualitäten bei Einhaltung des  $\text{NO}_x$ -Emissionsgrenzwerts ermittelt und andererseits Möglichkeiten zur Emissionsminderung durch Änderung der Anlageneinstellungen abgeleitet werden (z. B. unter Inkaufnahme steigender CO-Emissionen). Für diese Bestandsanlagen gilt eine Übergangsfrist bis zum 31.12.2027 [3]. Das Untersuchungsprogramm wurde so konzipiert, dass die Erkenntnisse auf möglichst viele Holzfeuerungsanlagentypen übertragen werden können.

Dabei standen vor allem Anlagen im Leistungsbereich zwischen 1 MW und 5 MW im Fokus. Die Messungen konnten an einer Anlage mit weniger als 1 MW Feuerungswärmeleistung durchgeführt werden, da derartige Anlagen hinsichtlich der Verbrennungstechnik zumeist gleichartig aufgebaut sind. Hinzu kommt, dass genehmigungspflichtige Anlagen häufig modular aus mehreren Kesseln aufgebaut sind, die für sich genommen jeweils unterhalb der 1-MW-Schwelle liegen können.

Somit wurden umfangreiche Untersuchungen zum Emissionsverhalten in Abhängigkeit von der Qualität der gelieferten Hackschnitzel am TFZ-Heizwerk von Oktober 2018 bis April 2019 durchgeführt. Ebenfalls erfolgten Emissionsmessungen an zwei weiteren Hackschnitzelheizwerken an bayerischen Standorten, um auch den Einfluss der Feuerungstechnik und der Brennstoffqualität zu erfassen.

In den hier untersuchten Feuerungsanlagen wurden die Stickstoffoxidemissionen vorrangig aus dem im Brennstoff enthaltenen Stickstoff gebildet, da hier die Brennraumtemperaturen typischerweise unter  $1.000\text{ °C}$  liegen. Die Bildung thermischer und prompter Stickstoffoxide findet erst bei deutlich höheren Temperaturen von über  $1.300\text{ °C}$  statt und kann somit vernachlässigt werden [7]. Neben dem Stickstoffgehalt spielt die Luftstufung in der Feuerung eine wesentliche Rolle bei der Stickstoffoxidbildung. So sollte der Brennstoff möglichst in einer ersten Stufe bei reduzierender Atmosphäre und bei hohen Temperaturen umgesetzt werden, ehe in der zweiten Stufe die brennbaren Gase bei niedrigeren Temperaturen oxidiert werden und somit auch die in der ersten Stufe noch vorhandenen hohen Kohlenmonoxidkonzentrationen wieder sinken. Einige Untersuchungen haben diesen Einfluss der gezielten Luftstufung auf die Stickstoffoxidemissionen auch bei verschiedenen Brennstoffen bestätigt [2].



## 2 Material und Methoden

### 2.1 Brennstoffsortimente und Brennstoffanalysen

Das Heizwerk am Technologie- und Förderzentrum (TFZ) wird mit naturbelassenen Hackschnitzeln betrieben. Hierbei werden Hackschnitzel der Region Straubing und Umgebung eingesetzt. Das Sortiment reicht von Hackschnitzeln aus Energierundholz über Waldrestholz bis hin zu Landschaftspflegematerial. Um das Verbrennungsverhalten von Hackschnitzeln aus dem Kurzumtrieb ebenfalls zu untersuchen, wurden Pappelhackschnitzel noch mit in den Untersuchungsumfang aufgenommen, zumal in zahlreichen bisherigen Messungen am TFZ mit diesem Brennstoff deutlich erhöhte Emissionen festgestellt worden waren [8]. Die Qualität der angelieferten Brennstoffe wurde nicht beeinflusst, um eine praxistypische und objektive Beurteilung des Emissionsverhaltens über eine gesamte Heizperiode zu gewährleisten.

Alle Hackschnitzel wurden per Lkw direkt an das TFZ-Heizwerk geliefert und in den Bunker eingefüllt. Während des Abkippvorgangs wurden jeweils insgesamt ca. 70 Liter Brennstoff über den gesamten Entladevorgang in ca. zehn Teilproben mit einem 10-Liter-Eimer für eine umfangreiche Brennstoffanalyse gesammelt (siehe Abbildung 1).



Abbildung 1: Probenahme der Hackschnitzel während des Entladevorgangs

Nach der Brennstoffbeprobung erfolgten eine Homogenisierung des Materials und die Bestimmung der Schüttdichte in einem 50-Liter-Behälter. Anschließend wurde die Probe für die Untersuchung der physikalischen Parameter am TFZ geteilt (siehe Tabelle 2).

*Tabelle 2: Relevante physikalische Qualitätsparameter und deren Einfluss auf die Verbrennung nach Prüfnorm*

| Parameter     | Einfluss auf den Prozess   | Gültige Prüfnorm   |
|---------------|--|--------------------|
| Aschegehalt   | Anlagenverschleiß, Glutbettbeschaffenheit, Partikelemissionen                    | DIN EN ISO 18122   |
| Wassergehalt  | Heizwert, Lagerfähigkeit, CO-Emissionen, Brennstoffmasse, Verbrennungstemperatur | DIN EN ISO 18134   |
| Schüttdichte  | Transport- und Lagerungsdichte   | DIN EN ISO 17828   |
| Partikelgröße | Trocknungseigenschaften, Brückenbildung, Verstopfen der Mechanik                 | DIN EN ISO 17827-1 |
| Feinanteil    | Aschegehalt, Emissionen  | DIN EN ISO 15149-1 |
| Heizwert      | Energieinhalt des Brennstoffs  | DIN EN ISO 18125   |

Alle Analysen bezüglich der Elementargehalte (Abschnitt 3.2.2) wurden durch die Firma Eurofins Umwelt Ost GmbH in Freiberg an den angelieferten auf 0,5 mm vermahlenden Brennstoffproben durchgeführt.

## 2.2 Messtechnik zur Emissionsüberwachung

Für die kontinuierliche Abgasanalyse wurde in der Regel der portable Gasanalysator Horiba PG 350E verwendet, der die Komponenten Sauerstoff (O<sub>2</sub>), Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Kohlenmonoxid (CO), Stickstoffoxide (NO<sub>x</sub>) und Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>) im trockenen Zustand bestimmt. Dabei setzen sich die Stickstoffoxide aus NO und NO<sub>2</sub> zusammen. Die Datenaufzeichnung erfolgte in einem Intervall von zehn Minuten und das Messgerät wurde einmal wöchentlich mit Kalibriergasen überprüft. Die Messungen begannen Anfang Oktober 2018 und dauerten bis Anfang April 2019 an. Phasenweise wurde auf die Gasanalyse verzichtet (zum Beispiel während der Weihnachtspause). Zwischenzeitlich kam es auch zu Störungen beim Messgerät, sodass ersatzweise ein tragbarer FTIR-Gasanalysator (Gasmeter FTIR DX4000N) verwendet wurde. Dieses mobile Messgerät wurde auch bei den Feldmessungen eingesetzt.

Für einige ausgewählte Brennstoffe wurde mit dem Staubmessgerät Wöhler SM 500 für Überwachungsmessungen nach 1. BImSchV auch der Gesamtstaubgehalt bestimmt, jedoch wurde dies aufgrund des erhöhten Zusatzaufwands nicht für alle Brennstofflieferungen oder Kesselleistungen durchgeführt. Abbildung 2 zeigt den Messaufbau während der Messungen am TFZ-Heizwerk.

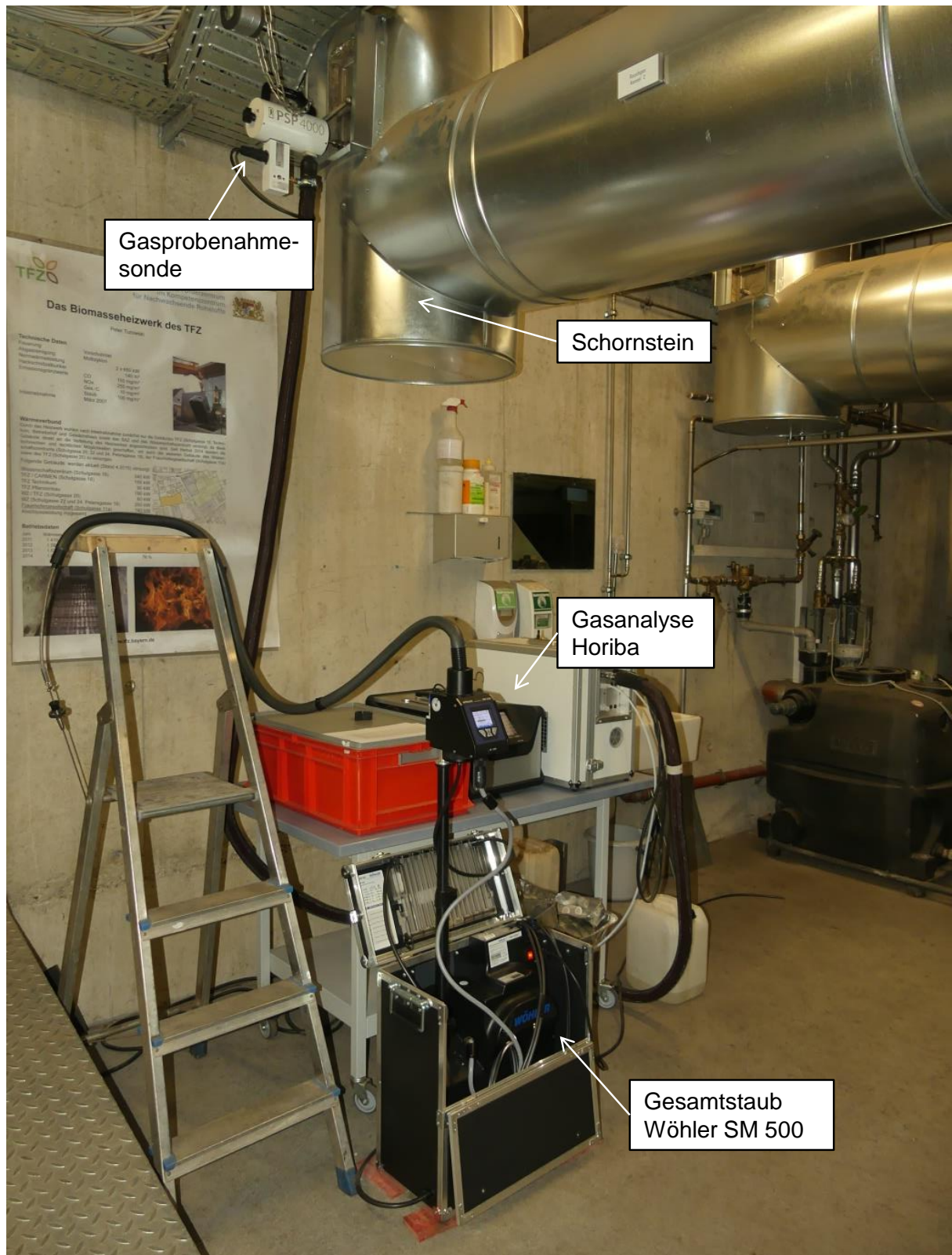


Abbildung 2: Anordnung der Messausrüstung während der Emissionsmessungen am TFZ-Heizwerk

### 2.3 TFZ-Heizwerk

Das TFZ-Heizwerk besteht aus zwei baugleichen 650-kW-Hackschnitzelkesseln der Firma Müller und wurde 2006 in Betrieb genommen. Die Kessel sind in Kaskade geschaltet, sodass je nach Wärmebedarf ein Kessel oder beide Kessel gemeinsam die Wärmeversorgung absichern. Die Hackschnitzel werden im Lkw angeliefert und direkt in den 140 m<sup>3</sup> großen Brennstoffbunker eingefüllt (siehe Abbildung 3, links). Während der nahezu kontinuierlichen Emissionsmessungen wurden erst wieder Hackschnitzel für das Heizwerk geordert, wenn der Bunker nur noch zu circa einem Viertel gefüllt war, um die verschiedenen Hackschnitzellieferungen auch konkret den Emissionen zuordnen zu können. Eine Vermischung verschiedener Hackschnitzellieferungen, wie es sonst der Fall gewesen wäre, wurde bewusst vermieden. In Abbildung 3 rechts ist die Anordnung der beiden 650-kW-Kessel der Firma Müller am TFZ zu sehen.



Abbildung 3: Anlieferung von Holzhackschnitzeln im Lkw direkt in den Bunker (links) und Heizkessel des TFZ-Heizwerks mit Aschecontainern im Vordergrund (rechts)

Über einen Schubboden im Brennstoffbunker werden die Hackschnitzel zur Förderschnecke geschoben und anschließend über weitere Förderschnecken zu den Kesseln weitergeleitet. Beide Kessel sind mit einem horizontalen Vorschubrost ausgestattet, sodass frisches Material in den hinteren Teil des Brennraums eingetragen und während des Ausbrands über den beweglichen Rost nach vorn geschoben wird. Die entstandene Asche fällt am Rostende in den Aschefang und wird über Schnecken aus dem Kessel ausgetragen. Die Verbrennungsluft ist gestuft und gelangt über zwei getrennt regelbare Gebläse als Primärluft durch den Rost und als Sekundärluft oberhalb des Rosts in die Brennkammer für den vollständigen Ausbrand der Abgase. Ein Teil der Abgase kann über die Rezirkulation in die Brennkammer zur Primärluft zurückgeführt werden, um einerseits die Turbulenz (Durchmischung) zu erhöhen und andererseits den Luftüberschuss und die Glutbetttemperatur zu begrenzen. Die Sauerstoffmessung für die Kesselregelung erfolgt im oberen Teil der Abgasstrecke. Eine schematische Darstellung des Funktionsprinzips des Kessels ist Abbildung 4 zu entnehmen.

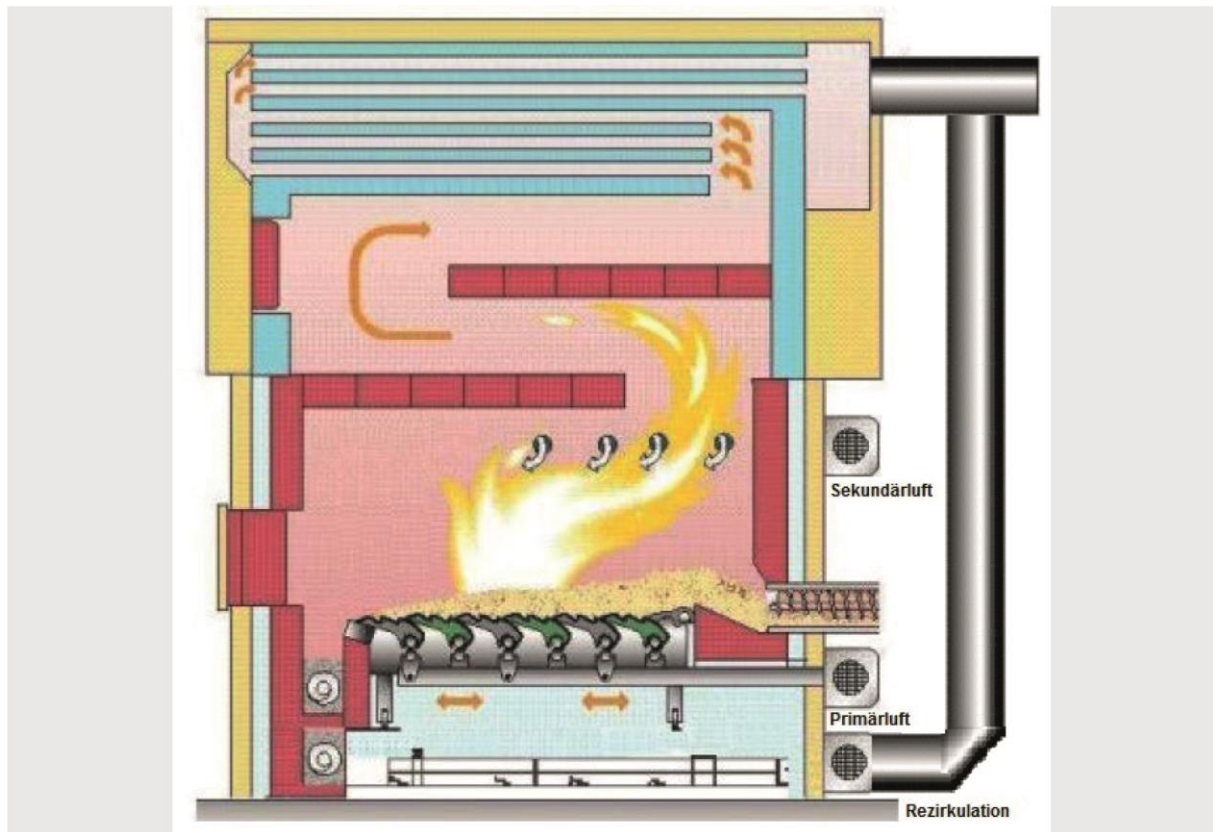


Abbildung 4: Funktionsprinzip eines Kessels am TFZ-Heizwerk, angepasst [12]

Das Abgas durchströmt die über der Brennkammer liegenden Wärmetauscher. Anschließend erfolgt die Rauchgasentstaubung in einem Multizyklon, bestehend aus 14 Einzelzyklonen. Nach der Entstaubung werden die gasförmigen Komponenten während der betrachteten Heizperiode im Abgas analysiert, ehe sie in den Schornstein eintreten.

## 2.4 Weitere Hackschnitzelheizwerke

### 2.4.1 Feldanlage 1

Feldanlage 1 heizt die Werkshallen eines Holzverarbeitenden Betriebs. Dieser stellt Holzfenster und -türen aus Naturholz her und nutzt die anfallenden Holzspäne verschiedener Holzarten im eigenen Heizwerk (siehe Abbildung 5, links). Das Heizwerk besteht aus zwei wesentlichen Komponenten. Die 1,5-MW-Feuerung des Herstellers Lambion ist eine Unterschubfeuerung mit Schnecke und wurde 1973 errichtet. Die Kesselanlage desselben Herstellers wurde 2005 erneuert; ihr Funktionsprinzip ist in Abbildung 5 rechts veranschaulicht. Die Abgase werden mittels Zyklon gereinigt.

Die Anlage wird taktend betrieben in Abhängigkeit von der Vorlauftemperatur. Wird die Vorlauftemperatur von ca. 50 °C unterschritten, geht das Heizwerk für circa. eine Stunde in Betrieb und wechselt später in den Gluterhalt.

Einige Impressionen der Anlage zeigen Abbildung 5 und Abbildung 6.

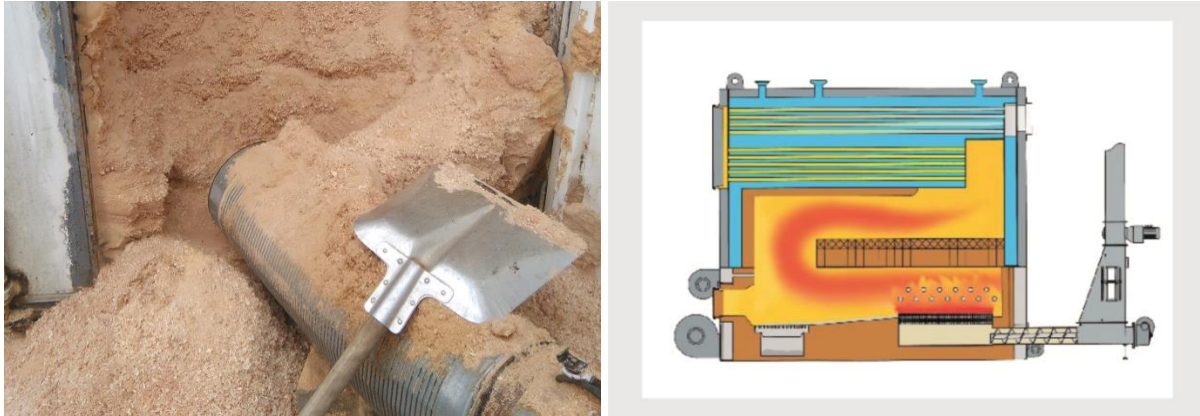


Abbildung 5: Links: Feldanlage 1 nutzt als Brennstoff Sägespäne (Quelle: TFZ), rechts: das Funktionsprinzip (Quelle: Feldanlagenbetreiber 1)



Abbildung 6: Feldanlage 1 mit dem Lambion-Kessel (links) und den Zyklonen sowie der Messanordnung während der Feldmessungen (rechts)

Die Brennraumtemperatur wurde separat über ein Video erfasst und für die Auswertungen herangezogen.

### 2.4.2 Feldanlage 2

Die zweite Feldanlage versorgt eine medizinische Einrichtung. Das Heizwerk wurde 2004 errichtet und als Brennstoff werden ausschließlich in der Region gewonnene, naturbelassene Hackschnitzel eingesetzt. Der jährliche Verbrauch beträgt circa 6.000 t. Die Hackschnitzel werden überdacht in einer Lagerhalle zwischengelagert (siehe Abbildung 7). Zur Beschickung des Heizwerks werden diese mithilfe eines Traktors mit Frontlader auf einem Schubboden aufgeschüttet und so auf den Treppenvorschubrost des Kessels befördert. Die Nennwärmeleistung der Anlage des Herstellers Kohlbach von 2004 beträgt 4 MW (siehe Abbildung 8). Die Asche wird automatisch in einen Aschecontainer ausgetragen. Bei zu trockenem Brennstoff sorgt eine Rauchgasrezirkulation für eine Ab-

kühlung der Brennkammer. Die Abgase passieren einen Vorzyklon und einen Elektrofilter. Nach der Abgasreinigung erfolgten die Emissionsmessungen des TFZ, ehe die Abgase in den 24 m hohen Schornstein mündeten



*Abbildung 7: Überdachte Brennstofflagerung bei der Feldanlage 2 mit hellen und dunklen Hackschnitzeln unterschiedlicher Qualität*



*Abbildung 8: Kessel- und Wärmetauschereinheit der Feldanlage 2 (links) und Messaufbau während der Feldmessungen (rechts)*

Das Funktionsprinzip von Feldanlage 2 ist in Abbildung 9 schematisch dargestellt.



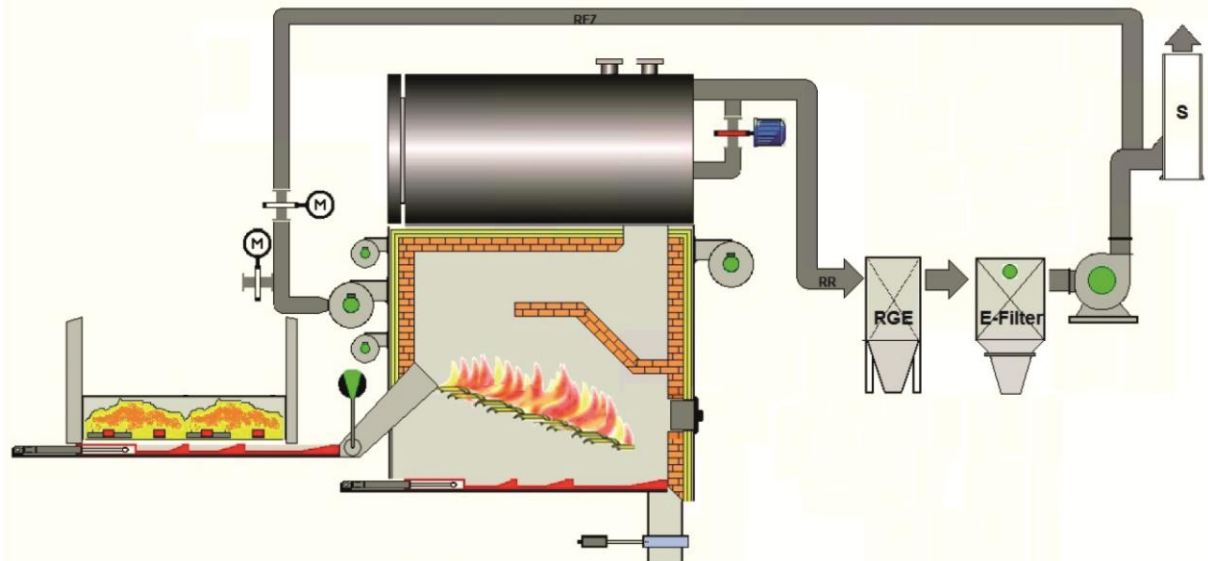


Abbildung 9: Funktionsprinzip der Feldanlage 2 mit Brennstoffzufuhr, Kesseleinheit und Abgasführung (Quelle: Feldanlagenbetreiber 2)

Während der Vor-Ort-Messungen im März 2019 wurden Hackschnitzel aus Waldrestholz und Hackschnitzel aus Landschaftspflegematerial zu etwa gleichen Anteilen gemischt und in die Anlage eingebracht und vom TFZ beprobt.



## 3 Ergebnisse

### 3.1 Brennstoffsortimente für das TFZ-Heizwerk

Während der durch Emissionsmessungen begleiteten Betriebsdauer von Oktober 2018 bis Anfang April 2019 wurden 39 Hackschnitzellieferungen am TFZ beprobt. Hierbei erfolgte keine Probenahme während der Weihnachtspause (17.12.2018 bis 08.01.2019). Es wurden vier verschiedene Qualitäten von hauptsächlich zwei Hackschnitzellieferanten am TFZ-Heizwerk eingesetzt. Davon wurden zehn Chargen Hackschnitzel aus Energierundholz (Erh), 24 Chargen aus Waldrestholz (Wrh), drei Chargen aus dem Kurzumtrieb (KUP, hier Pappel) und zwei Chargen aus Landschaftspflegematerial (LPM) geliefert. Insgesamt wurden so ca. 640 t Hackschnitzel (bezogen auf 30 m-% Wassergehalt) untersucht.

Eine Übersicht über Lieferdatum, Lieferantenzuordnung, gelieferte Menge sowie eine Kurzbeschreibung sind in Tabelle 5 des Anhangs zusammengestellt. Einen optischen Vergleich aller Hackschnitzellieferungen bietet Tabelle 6 im Anhang. Wie dort zu sehen ist, gibt es hellere und dunklere Hackschnitzel sowie Hackschnitzel mit mehr oder weniger Verunreinigungen bzw. Nadelanteilen. Diese optischen Unterschiede weisen bereits auf entsprechende Auswirkungen auf die verbrennungstechnischen Eigenschaften hin.

### 3.2 Brennstoffanalysen für die Hackschnitzelsortimente des TFZ-Heizwerks

#### 3.2.1 Wassergehalt, Aschegehalt, Heizwert, Feingehalt und Schüttdichte

Der Wassergehalt des Brennstoffs ist ein wesentlicher Parameter, der die Verbrennung und somit das Emissionsverhalten beeinflusst. Vor allem kleinere Kesselanlagen reagieren empfindlich auf veränderliche Wassergehalte [13], wohingegen größere Heizwerke Brennstoffe mit einem höheren Wassergehalt emissionsarm verbrennen können, wenn die Anlage darauf eingestellt ist. Im Rahmen der Untersuchungen wurde eine große Bandbreite des Wassergehalts von ca. 19,1 m-% bis 50,6 m-% abgedeckt (siehe Abbildung 10). Dabei betrug der Wassergehalt der Hackschnitzel von Lieferant 1 durchschnittlich 27 m-%, da das Material bereits im Sommer geerntet und als Gipfel- und Stammholz bis zu einem Durchmesser von 20 cm gelagert worden war. Kurz vor der Lieferung an das TFZ wurde das Material gehackt. Die Wassergehalte der Hackschnitzel des zweiten Lieferanten wiesen dagegen einen meist höheren Wassergehalt von durchschnittlich 41 m-% auf. Die drei Lieferungen aus dem Kurzumtrieb hatten einen mittleren Wassergehalt von ca. 44 m-% und waren somit unterhalb des typischen Wassergehalts erntefrischer Pappel (über 50 m-%), was daran lag, dass das ungehackte Holz bereits längere Zeit vorgelagert worden war.

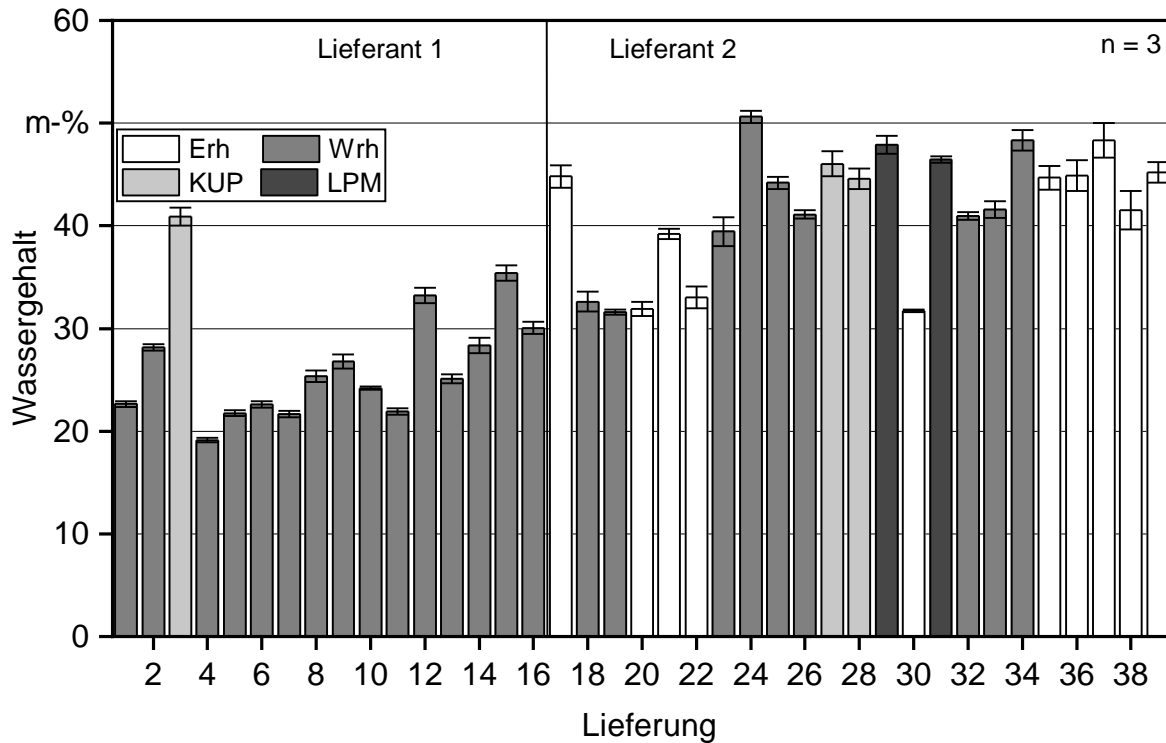


Abbildung 10: Wassergehalt aller im Messzeitraum gelieferten Hackschnitzelsortimente für das TFZ-Heizwerk im Anlieferungszustand

Der Aschegehalt im trockenen Zustand der Hackschnitzelproben hängt hauptsächlich vom Holzsortiment ab und beeinflusst neben dem Verbrennungsverhalten auch die Häufigkeit der Entleerung der Aschecontainer. Energierundholz zeigte die geringsten Aschegehalte zwischen 0,2 m-% und 1,4 m-% auf (siehe Abbildung 11). Im Gegensatz dazu lagen die Aschegehalte von Waldrestholz zwischen 0,7 m-% und 5,8 m-%. Die drei Pappelsortimente wiesen einen für Hackschnitzel aus dem Kurzumtrieb typischen Wert von durchschnittlich 2,1 m-% auf [8]. Bei den beiden Proben aus Landschaftspflegematerial wurde der Effekt des Siebens deutlich, z. B. beim Vergleich des ungesiebten Materials der Lieferung 29 mit dem gesiebten Material der Lieferung 31, der Aschegehalt wurde dadurch von 4,4 m-% auf 1,4 m-% reduziert.

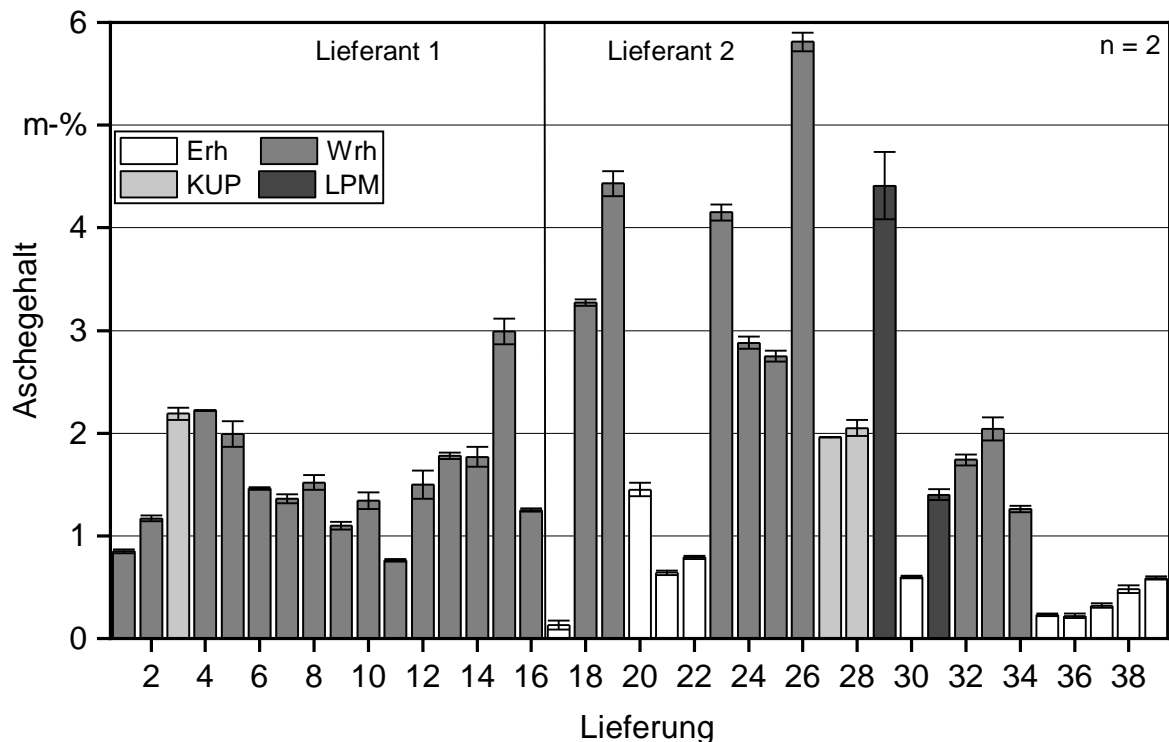


Abbildung 11: Aschegehalt aller im Messzeitraum gelieferten Hackschnitzelsortimente für das TFZ-Heizwerk, bezogen auf die Trockenmasse

Der Heizwert der Trockenmasse aller Hackschnitzelsortimente lag zwischen 18,0 MJ/kg und 19,7 MJ/kg (siehe Abbildung 12). Für Hackschnitzel aus Energierundholz betrug der Heizwert durchschnittlich 19,0 MJ/kg und war für alle zehn Lieferungen auf einem ähnlichen Niveau. Für die Pappelhackschnitzel lag der Heizwert erwartungsgemäß niedriger, hier bei ca. 18,5 MJ/kg. Eine deutlich größere Bandbreite zeigte der Heizwert der Hackschnitzel aus Waldrestholz mit Werten zwischen 18,0 MJ/kg und 19,7 MJ/kg. Der niedrigste Heizwert wurde für die Hackschnitzel der Lieferung 26 bestimmt, die sich durch den höchsten Aschegehalt auszeichneten (siehe Abbildung 11). Auffällig ist auch, dass die Heizwerte der Hackschnitzelsortimente bei Lieferant 1 fast durchwegs höher lagen als bei Lieferant 2.

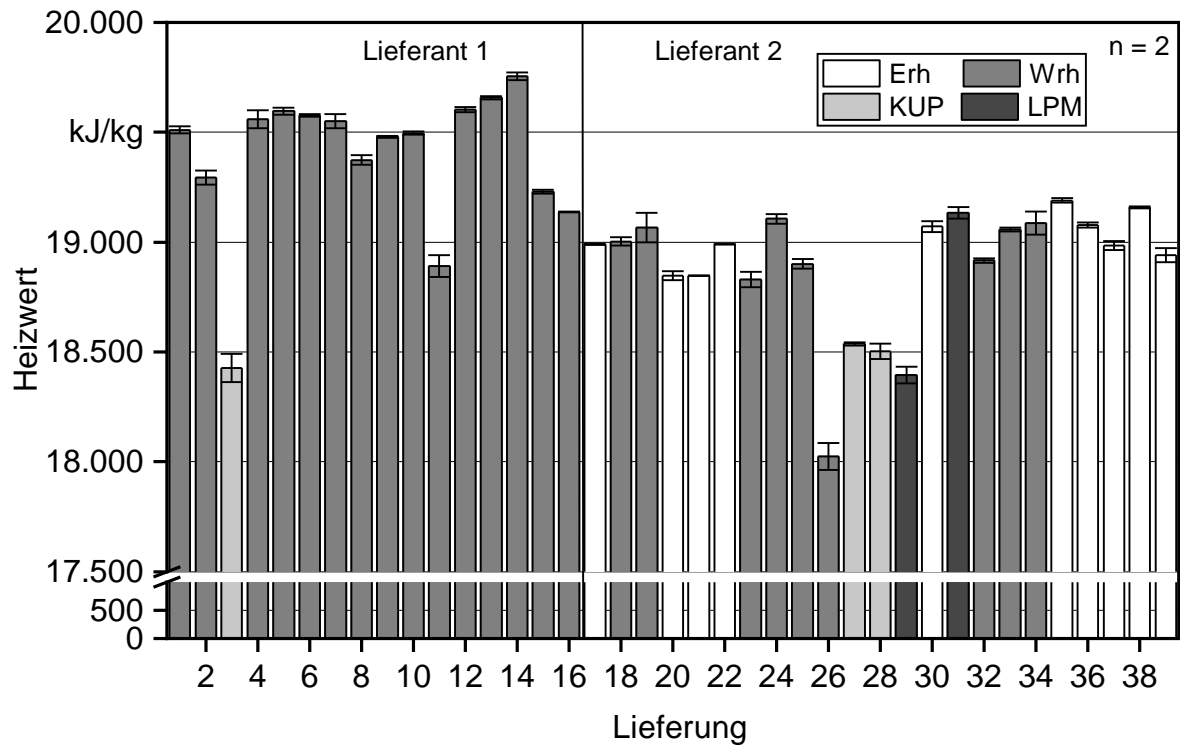


Abbildung 12: Heizwert aller im Messzeitraum gelieferten Hackschnitzelsortimente für das TFZ-Heizwerk, bezogen auf die Trockenmasse

In der nachfolgenden Abbildung 13 ist der Heizwert in Abhängigkeit vom Aschegehalt aufgetragen. Mit zunehmendem Aschegehalt im Brennstoff (und damit einer zunehmenden Verunreinigung durch nicht brennbares Material) sinkt der Heizwert zum Teil deutlich.

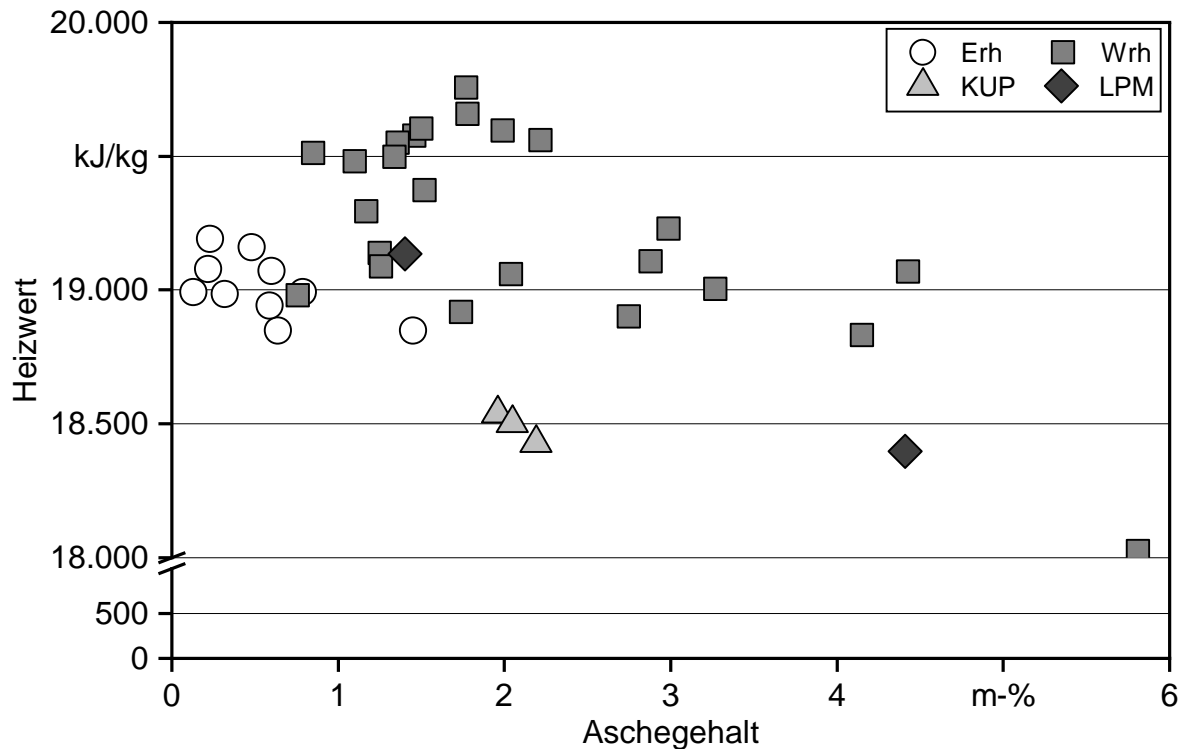


Abbildung 13: Korrelation zwischen Heizwert und Aschegehalt, jeweils bezogen auf die Trockenmasse

Der Feinanteil für Partikel kleiner 3,15 mm lag bei 1,0 m-% bis 21,6 m-% (siehe Abbildung 14). Fast alle Sortimente aus Energierundholz hatten einen Feinanteil von unter 5 m-%. Durchschnittlich betrug der Feinanteil für die drei Pappelsortimente 6,4 m-% und lag somit unter den durchschnittlichen Werten von Waldrestholz mit einem Feingehalt von ca. 12,7 m-%. Die Aufbereitung des Landschaftspflegematerials durch das Sieben reduzierte den Feinanteil von 10,6 m-% auf 8,0 m-%. Die Korngrößenverteilung aller Hackschnitzelsortimente ist in Tabelle 8 im Anhang zusammengestellt.

Wie Abbildung 15 zeigt, steigt der Aschegehalt mit zunehmendem Feinanteil an.

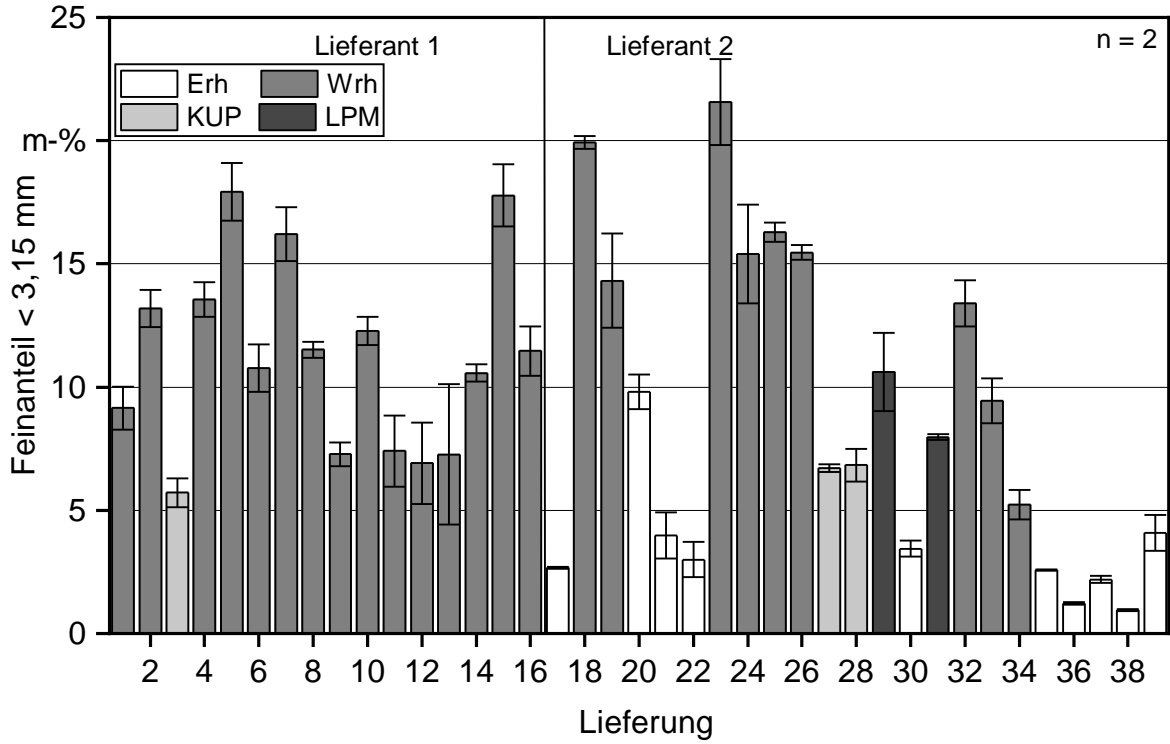


Abbildung 14: Feinanteil aller im Messzeitraum gelieferten Hackschnitzelsortimente für das TFZ-Heizwerk

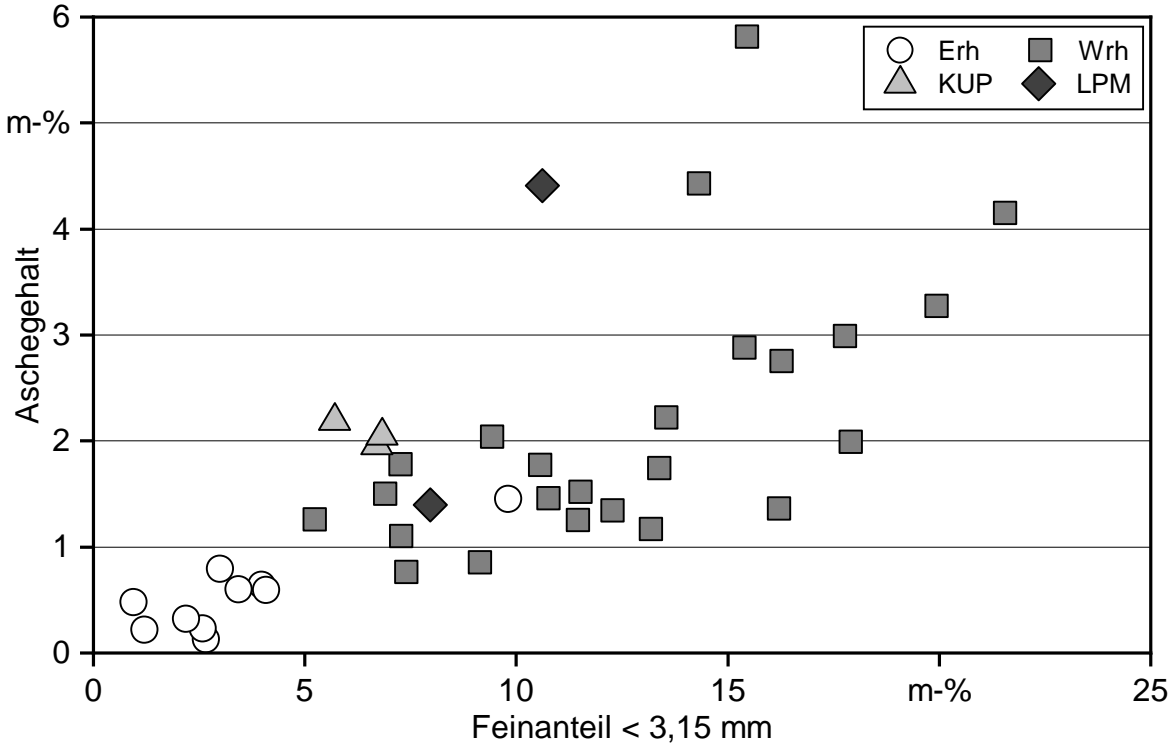


Abbildung 15: Aschegehalt in Abhängigkeit vom Feinanteil für alle im Messzeitraum gelieferten Hackschnitzelsortimente für das TFZ-Heizwerk



Die Schüttdichte (ohne Schrumpfung und auf wasserfreier Basis) lag zwischen  $142 \text{ kg/m}^3$  und  $207 \text{ kg/m}^3$  (siehe Abbildung 16). Zwischen den verschiedenen Hackschnitzelqualitäten kann bezüglich der Schüttdichte keine weitere Unterscheidung erfolgen.

Die physikalischen Parameter aller Brennstofflieferungen sind in Tabelle 7 im Anhang zusammengestellt.

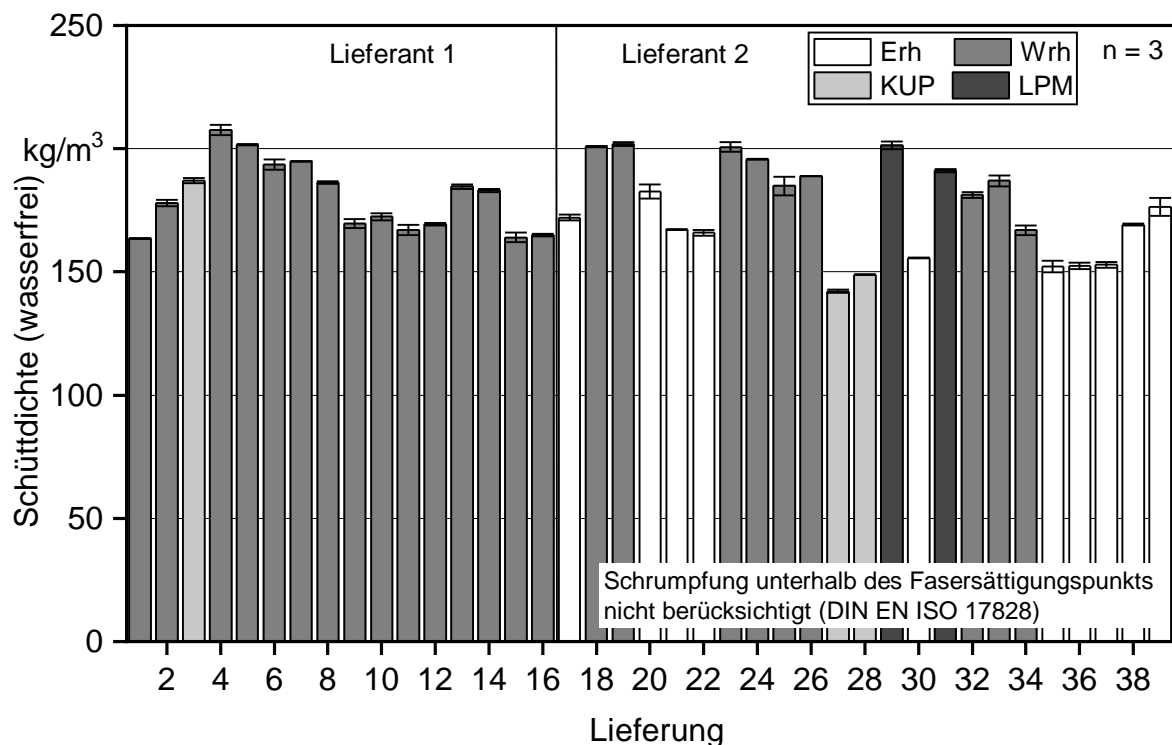


Abbildung 16: Schüttdichte ohne Schrumpfung für alle im Messzeitraum gelieferten Hackschnitzelsortimente für das TFZ-Heizwerk

### 3.2.2 Elementarzusammensetzung

Biogene Festbrennstoffe setzen sich hauptsächlich aus Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H), Sauerstoff (O), den Elementen Stickstoff (N), Schwefel (S) und Chlor (Cl) zusammen, deren Gehalte in Tabelle 9 zusammengestellt sind. Aber auch die Gehalte an Aluminium (Al), Kalium (K), Calcium (Ca), Magnesium (Mg), Natrium (Na), Eisen (Fe), Phosphor (P) und Silizium (Si) wurden ermittelt und sind Tabelle 10 zu entnehmen. Schwermetalle wurden im Rahmen der Untersuchungen nicht bestimmt.

Das Hauptinteresse richtete sich in dieser Studie auf den Stickstoffgehalt im Brennstoff, da dieser einen wesentlichen Beitrag zu den Stickstoffoxidemissionen liefert. Diese Werte sind in Abbildung 17 grafisch dargestellt. Der Stickstoffgehalt der Hackschnitzel aus Energierundholz beträgt meist weniger als 0,1 m-%. Für Hackschnitzel aus Waldrestholz betrug der Stickstoffgehalt zwischen 0,15 m-% und 0,44 m-%. Die Lieferungen 23, 25 und 26 zeigten Stickstoffgehalte von über 0,4 m-%, was auch rein optisch durch einen

deutlich höheren Rinden- und Nadelanteil in der Hackschnitzellieferung begründet werden kann (siehe Tabelle 6). Bei den beiden Sortimenten aus Landschaftspflegematerial wurden Werte von 0,31 m-% bzw. 0,32 m-% bestimmt, was darauf hindeutet, dass die Siebung keine Reduzierung des Stickstoffgehalts bewirkte. Das kann dadurch begründet werden, dass Landschaftspflegematerial vorrangig aus Laubholz besteht und somit keine Nadeln durch den Siebvorgang abgetrennt wurden. Bei Waldrestholz kann im Gegensatz dazu aufgrund der Reduzierung des Nadelanteils im Brennstoff die Siebung zu einer Verringerung des Stickstoffgehalts im Brennstoff führen [10]. Für die drei Pappellieferungen lagen die Stickstoffgehalte zwischen 0,15 m-% und 0,4 m-%.

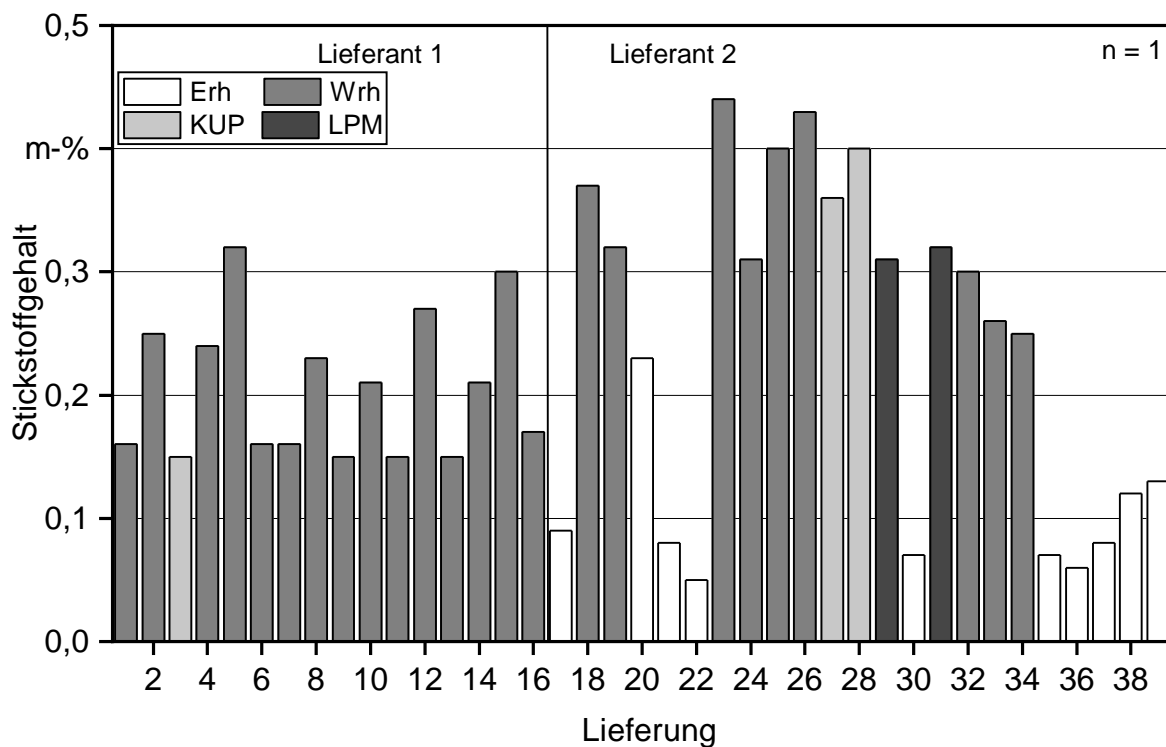


Abbildung 17: Stickstoffgehalt für alle im Messzeitraum gelieferten Hackschnitzelsortimente für das TFZ-Heizwerk, bezogen auf die Trockenmasse

In Abbildung 18 ist ein steigender Stickstoffgehalt im Brennstoff mit zunehmendem Feinanteil dargestellt. Die Darstellung zeigt, dass ein höherer Feinanteil als erster Indikator für stickstoffreichere Hackschnitzelsortimente gelten kann. Das Gleiche gilt für einen zunehmenden Aschegehalt im Brennstoff, hier nicht gezeigt.

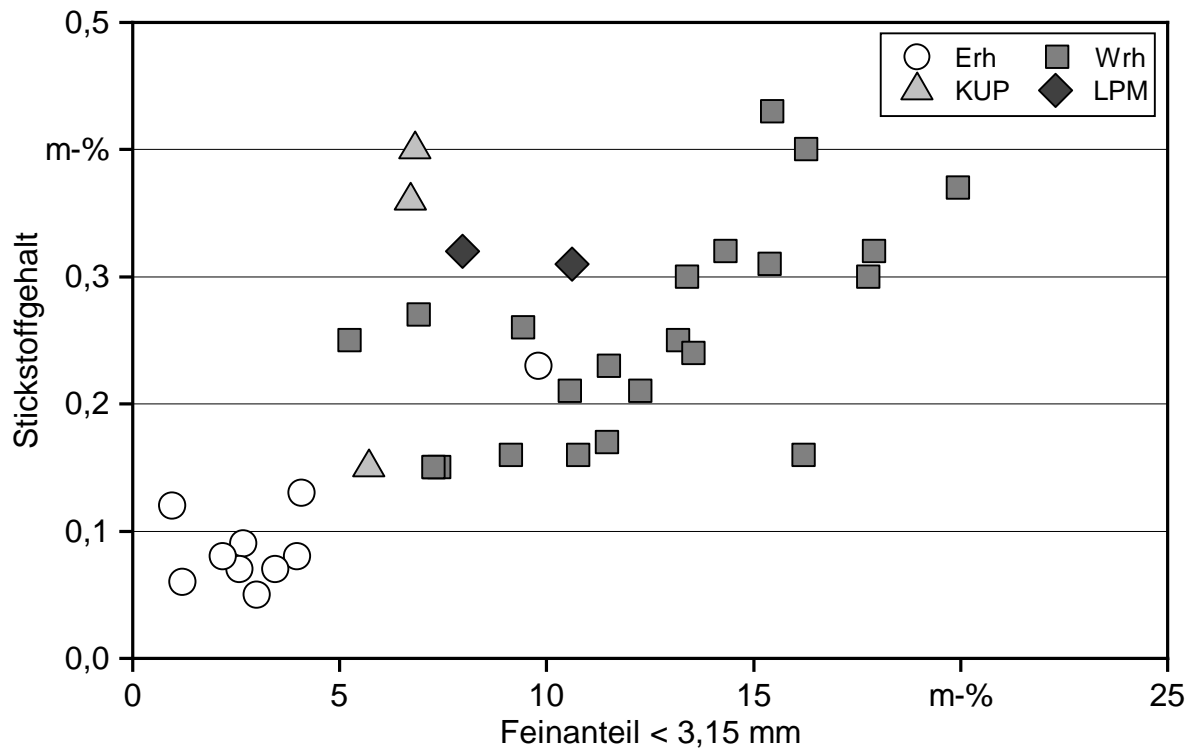


Abbildung 18: Zusammenhang zwischen Stickstoffgehalt im Brennstoff bezogen auf die Trockenmasse und Feinanteil für alle im Messzeitraum gelieferten Hackschnittsortimente

Abschließend ist die Summe der Elemente Kalium und Natrium (bezogen auf die Trockenmasse) in Abbildung 19 als Indikator für die Feinstaubbildung zusammengestellt. Die geringsten Werte wurden in den Proben aus Energierundholz nachgewiesen. Die drei Pappelsortimente zeichnen sich durch Werte zwischen 2.595 mg/kg und 2.885 mg/kg aus und lassen eine erhöhte Feinstaubbildung im Vergleich zu den anderen Sortimenten erwarten.

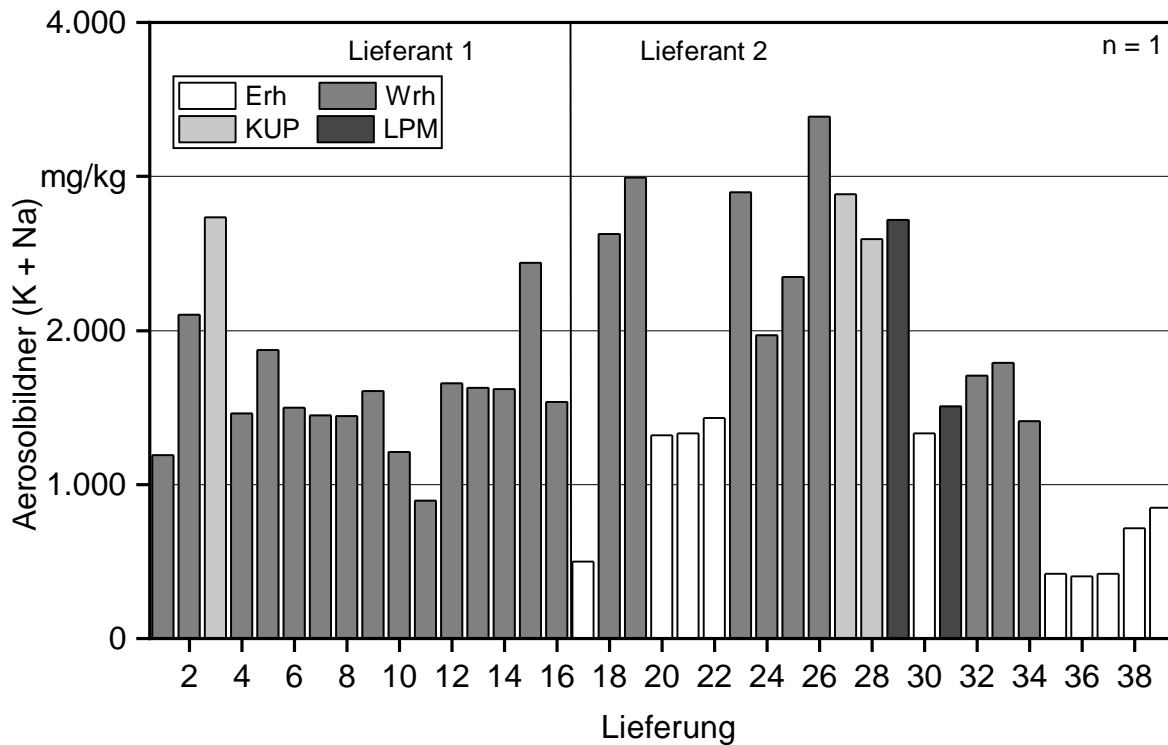


Abbildung 19: Summe der Aerosolbildner Kalium und Natrium aller im Messzeitraum gelieferten Hackschnitzelsortimente für das TFZ-Heizwerk, bezogen auf die Trockenmasse

### 3.2.3 Brennstoffeigenschaften bei den Feldanlagen

Auch während der Feldmessungen wurden jeweils ausreichend große Proben der eingesetzten Brennstoffe gewonnen und die gleichen Untersuchungen wie für die Hackschnitzellieferungen an das TFZ-Heizwerk durchgeführt.

Wesentliche Eigenschaften der Brennstoffe der beiden Feldanlagen sind in Tabelle 3 und Tabelle 4 zusammengestellt. Die in der Feldanlage 1 verwendeten Sägespäne weisen einen sehr niedrigen Wassergehalt von 9,7 m-%, einen geringen Aschegehalt von 0,28 m-%, eine niedrige Schüttdichte von  $115 \text{ kg/m}^3$ , aber auch einen hohen Feinanteil von 65 m-% auf. Im Gegensatz dazu haben die Hackschnitzelproben von Feldanlage 2 einen Wassergehalt von 34 m-% und einen stark unterschiedlichen Aschegehalt von 2,8 m-% für die hellen Hackschnitzel und 10,8 m-% für die dunklen Hackschnitzel. Die dunklen Hackschnitzel weisen somit einen beinahe viermal so hohen Aschegehalt auf wie die Hackschnitzelsortimente für das TFZ-Heizwerk.

**Tabelle 3:** Brennstoffeigenschaften bei den untersuchten Feldanlagen  
(ar – im Anlieferungszustand, d – bezogen auf die Trockenmasse)

| Anlage | Brennstoff              | Wasser-<br>gehalt<br>m-%, ar | Aschegehalt<br>m-%, d | Heizwert<br>kJ/kg, d | Schüttdichte<br>kg/m <sup>3</sup> , d | Feinanteil<br>m-% |
|--------|-------------------------|------------------------------|-----------------------|----------------------|---------------------------------------|-------------------|
| 1      | Sägespäne               | 9,7 ± 0,29                   | 0,28 ± 0,02           | 18.960 ± 16          | 114,8 ± 0,21                          | 65,09             |
| 2      | helle<br>Hackschnitzel  | 34,0 ± 0,22                  | 2,84 ± 0,0            | 18.332 ± 28          | 196,2 ± 0,40                          | 7,07              |
| 2      | dunkle<br>Hackschnitzel | 34,4 ± 0,25                  | 10,84 ± 0,37          | 17.060 ± 47          | 169,0 ± 2,55                          | 11,45             |

Der Stickstoffgehalt der Sägespäne liegt mit 0,06 m-% im Bereich der Werte von Energierundholz. Deutlich höhere Stickstoffgehalte wurden in den Hackschnitzelproben festgestellt, deren Werte zwischen 0,39 m-% (dunkle Hackschnitzel) und 0,47 m-% (helle Hackschnitzel) liegen, was auch dem Stickstoffgehalt einiger Sortimente vom TFZ-Heizwerk entspricht.

**Tabelle 4:** Hauptelemente der Brennstoffe der Feldanlagen, jeweils bezogen auf die Trockenmasse

| Anlage | Brennstoff              | C<br>m-% | H<br>m-% | N<br>m-% | S<br>m-% | Cl<br>m-% |
|--------|-------------------------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| 1      | Sägespäne               | 50,9     | 6,3      | 0,06     | < 0,005  | 0,010     |
| 2      | helle<br>Hackschnitzel  | 49,3     | 6,1      | 0,47     | 0,028    | 0,022     |
| 2      | dunkle<br>Hackschnitzel | 45,2     | 5,5      | 0,39     | 0,031    | 0,044     |

### 3.3 Emissionsverhalten des TFZ-Heizwerks

#### 3.3.1 Stickstoffoxidemissionen

In diesem Abschnitt soll das Emissionsverhalten des TFZ-Heizwerks in Abhängigkeit von der Brennstoffbeschaffenheit dargestellt werden, wobei der Schwerpunkt auf den Stickstoffoxidemissionen (NO<sub>x</sub>) liegt. In den nachfolgenden Betrachtungen ist stets nur das Emissionsverhalten eines der beiden baugleichen Heizkessel dargestellt, da die Abgase der Kessel jeweils separat über einen eigenen Schornstein abgeleitet werden. Die Kesselauflastung bezieht sich somit immer auf den Kessel, an dem die Emissionsmessungen momentan durchgeführt wurden. Die Betriebsweise des zweiten Kessels ist somit irrelevant.

Für die Datenauswertung wurde zunächst die Heizperiode in zwei Phasen unterteilt. In der ersten Phase der Heizperiode von Anfang Oktober bis Mitte Dezember 2018 wurde

das Heizwerk hauptsächlich von Lieferant 1 versorgt. Die Kesselauslastung lag in der ersten Phase der Heizperiode während 52 % der Einsatzzeit unter 50 %. In 19 % der Einsatzzeit betrug die Kesselauslastung mehr als 70 %, davon lediglich 7 % mehr als 90 %. In der zweiten Phase der Heizperiode ab Januar 2019 lag die Kesselauslastung nur in 42 % der Einsatzzeit bei unter 50 %. In 29 % der Zeit betrug die Kesselauslastung über 70 % und in 13 % der Einsatzzeit über 90 %.

Der Verlauf der  $\text{NO}_x$ -Emissionen sowie der Kesselauslastung in Teil 1 der Heizperiode ist in Abbildung 20 dargestellt. Zu Vergleichszwecken ist auch der neue Grenzwert für die Stickstoffoxidemissionen in Höhe von  $370 \text{ mg/Nm}^3$  (6 Vol.-%  $\text{O}_2$ ) eingezeichnet. Während dieser Zeit kam es nur zu gelegentlichen Überschreitungen des neuen Grenzwerts. Vor allem die Lieferung 15 (Mitte Dezember 2018) führte aufgrund eines erhöhten Stickstoffgehalts im Brennstoff zu  $\text{NO}_x$ -Emissionen von über  $400 \text{ mg/Nm}^3$ . Der Brennstoff Pappel aus zehnjährigem Umtrieb (3. Lieferung, Messzeitraum 26.10. bis 28.10.2018) fällt hier nicht mit höheren  $\text{NO}_x$ -gehalten auf, die Konzentrationen lagen zwischen  $270 \text{ mg/Nm}^3$  bei 30 % Kesselauslastung und  $380 \text{ mg/Nm}^3$  bei 91 % Kesselauslastung.

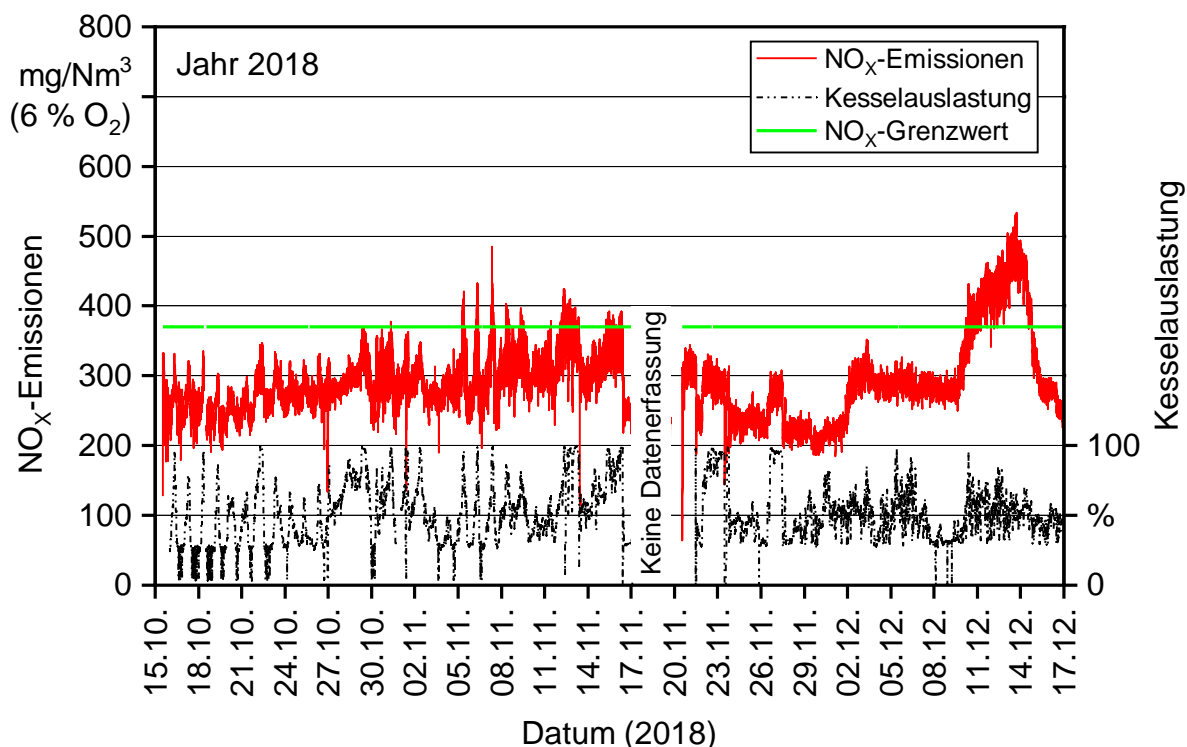


Abbildung 20: Zeitlicher Verlauf der Stickstoffoxidemissionen und der Kesselauslastung von Oktober bis Mitte Dezember 2018 am TFZ-Heizwerk (Grenzwert: 44. BImSchV:  $370 \text{ mg/Nm}^3$  bei 6 %  $\text{O}_2$ )

Aus diesen Daten wurden die Brennstoff-Emissions-Wertepaare für die einzelnen Brennstofflieferungen bei verschiedenen Kesselauslastungen herausgezogen, sie sind in Abbildung 21 für die erste Phase der Heizperiode (Lieferant 1) dargestellt. Wie zu erkennen ist, fallen die  $\text{NO}_x$ -Emissionen bei einer niedrigeren Kesselauslastung geringer aus. Für

Stickstoffgehalte zwischen 0,15 m-% und 0,32 m-% wurde der aktuelle Abgasgrenzwert fast durchgängig eingehalten. Lediglich in 9 % der Messdauer wurden die neuen  $\text{NO}_x$ -Grenzwerte überschritten – und das fast ausschließlich mit der Brennstofflieferung 15.

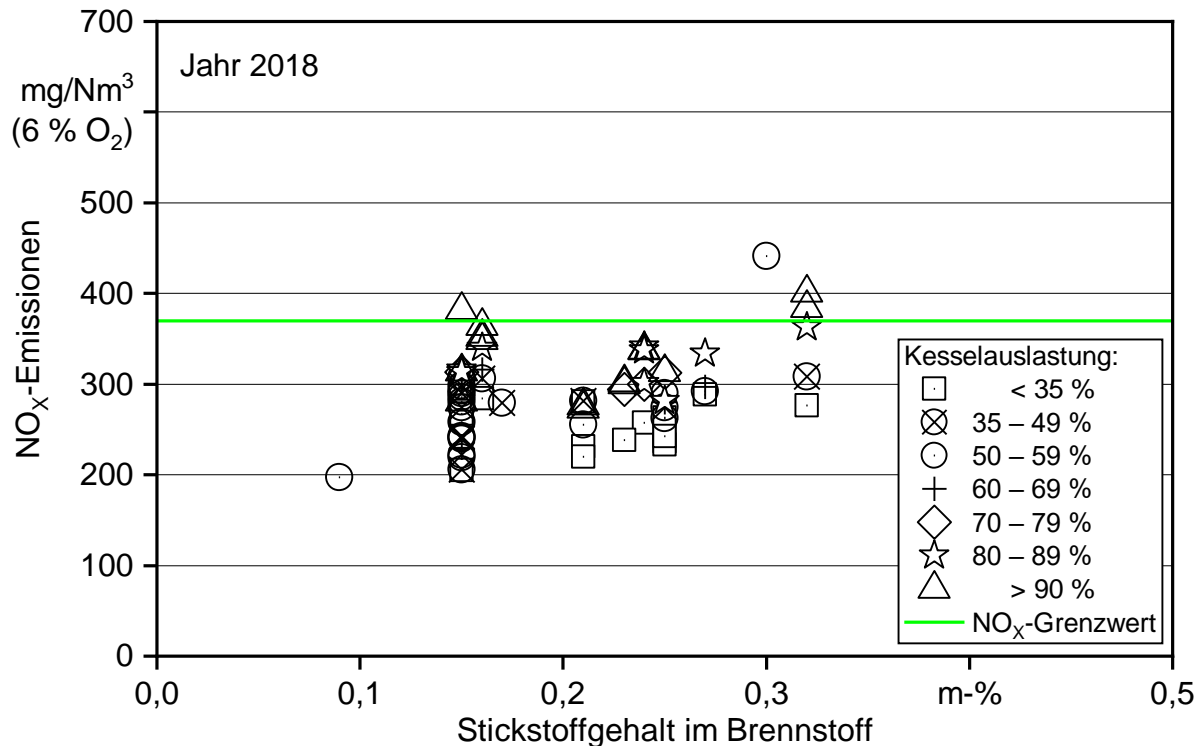


Abbildung 21:  $\text{NO}_x$ -Emissionen in Abhängigkeit vom Stickstoffgehalt des Brennstoffs (bezogen auf die Trockenmasse) bei verschiedenen Kesselauslastungen am TFZ-Heizwerk in 2018 (Grenzwert: 44. BImSchV: 370  $\text{mg}/\text{Nm}^3$  bei 6 %  $\text{O}_2$ )

In der zweiten Phase der Heizperiode von Januar bis Anfang April 2019 wurde das TFZ-Heizwerk vom zweiten Lieferanten versorgt. Hier werden die Unterschiede der Hackschnitzelqualitäten bei verschiedenen Stickstoffgehalten in den  $\text{NO}_x$ -Emissionen deutlich (Abbildung 22). Bei der Verbrennung von Hackschnitzeln aus Energierundholz lagen die  $\text{NO}_x$ -Emissionen bei unter 200  $\text{mg}/\text{Nm}^3$ , wie beispielsweise Ende Januar mit den Brennstofflieferungen 21 und 22 oder im Zeitraum um den 6. März bei Lieferung 30. Die maximalen Stickstoffoxidemissionen wurden für die Lieferungen 26 und 27 (Mitte Februar) mit Werten von über 600  $\text{mg}/\text{Nm}^3$  bei 100 % Kesselauslastung festgestellt.

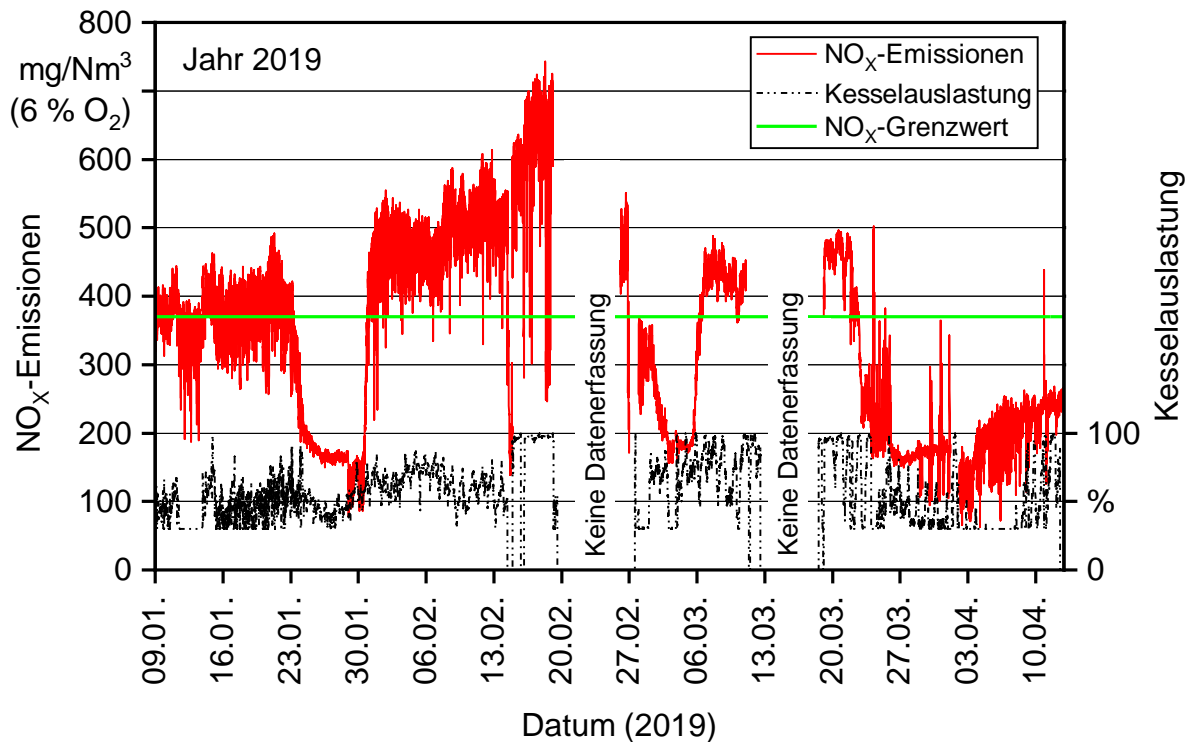


Abbildung 22: Zeitlicher Verlauf der Stickstoffoxidemissionen und der Kesselauslastung von Januar bis Mitte April 2019 am TFZ-Heizwerk (Grenzwert: 44. BImSchV:  $370 \text{ mg/Nm}^3$  bei 6 %  $\text{O}_2$ )

Analog zur ersten Heizperiode wurden für die einzelnen Brennstofflieferungen die Wertepaare bestehend aus Brennstoff-Stickstoffgehalt und  $\text{NO}_x$ -Konzentration herausgezogen, bei möglichst unterschiedlichen Kesselauslastungen. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 23 zusammengestellt. Auffällig ist für die Brennstoffe des zweiten Lieferanten, dass der Stickstoffgehalt im Brennstoff hier zwei Kategorien zugeordnet werden kann. Brennstoffe mit einem Stickstoffgehalt von unter 0,1 m-% verursachten  $\text{NO}_x$ -Emissionen von unter  $300 \text{ mg/Nm}^3$  für Hackschnitzel aus Energierundholz und für alle anderen Brennstoffe mit einem Stickstoffgehalt von 0,2 m-% bis 0,43 m-% kommt es teilweise zu deutlichen Überschreitungen des neuen Grenzwerts für Stickstoffoxide. Vor allem bei den Brennstoffsortimenten mit einem Stickstoffgehalt von 0,4 m-% und darüber wurden bei jeder Kesselauslastung  $\text{NO}_x$ -Werte von über  $400 \text{ mg/Nm}^3$  ermittelt. Für die Hackschnitzellieferungen aus Pappel, Umtriebszeit unbekannt, erfolgte lediglich eine kurzzeitige Aufzeichnung der Abgaszusammensetzung aufgrund eines Gerätedefekts. Jedoch zeigte sich in der kurzen Messzeit bereits, dass die  $\text{NO}_x$ -Emissionen bei voller Kesselauslastung mit  $620 \text{ mg/Nm}^3$  deutlich über dem neuen Grenzwert lagen, was auch mit dem relativ hohen Stickstoffgehalt von 0,36 mg/kg bei gleichzeitig hohem Wassergehalt zu begründen ist.

Aufgrund der geringen Hackschnitzellieferungen aus Energierundholz im Vergleich zu den restlichen Lieferungen wurde der neue  $\text{NO}_x$ -Grenzwert in Phase 2 während ca. 64 % der Messzeit überschritten.



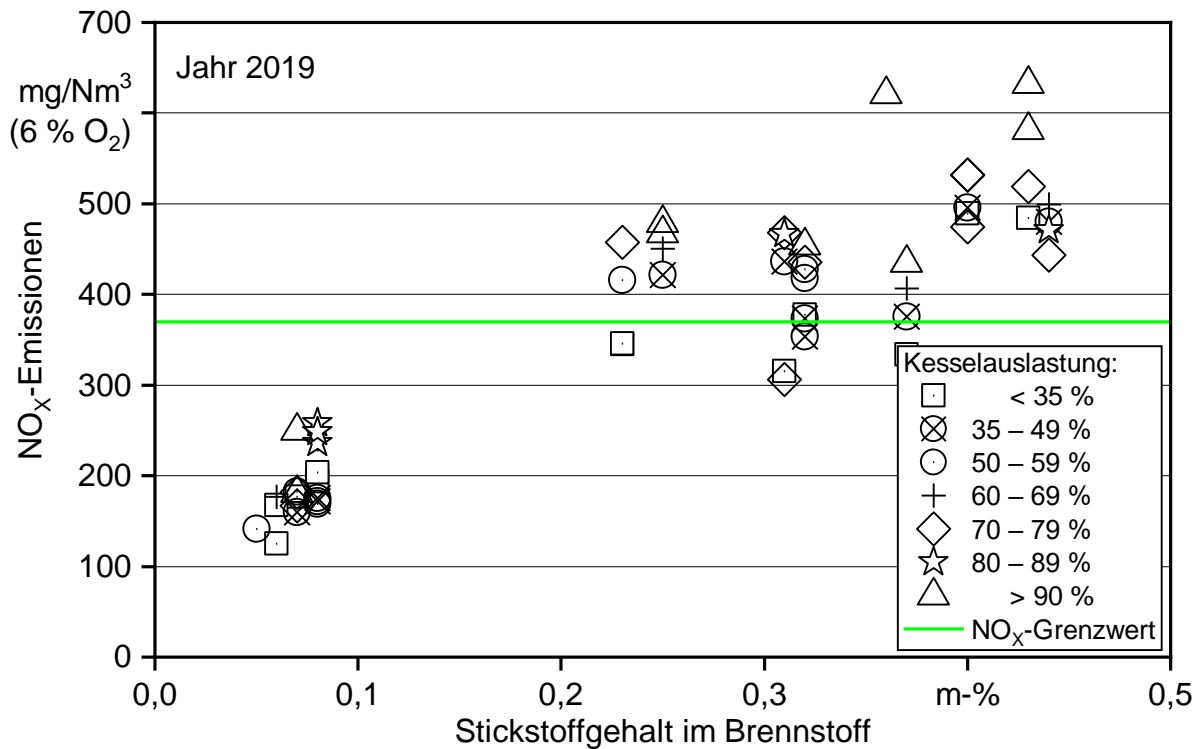


Abbildung 23: NO<sub>x</sub>-Emissionen in Abhängigkeit vom Stickstoffgehalt des Brennstoffs (bezogen auf die Trockenmasse) bei verschiedenen Kesselauslastungen am TFZ-Heizwerk in 2019 (Grenzwert: 44. BImSchV: 370 mg/Nm<sup>3</sup> bei 6 % O<sub>2</sub>)

Für jede Brennstofflieferung zeigt Abbildung 24 die NO<sub>x</sub>-Emissionen, wobei die Emissionen höher ausfallen bei einer höheren Kesselauslastung. Es kann damit gezeigt werden, dass bei der Verbrennung von KUP-Brennstoffen die Grenzwerte bezüglich NO<sub>x</sub> auch eingehalten werden können. Ebenso konnte mit der ersten Lieferung des Landschaftspflegematerials der Grenzwert eingehalten werden. Für alle Energierundholzlieferungen, außer Lieferung 20 mit einem Brennstoffstickstoffgehalt von 0,23 m-%, ist die Einhaltung in jeder Leistungsklasse gut zu erkennen.

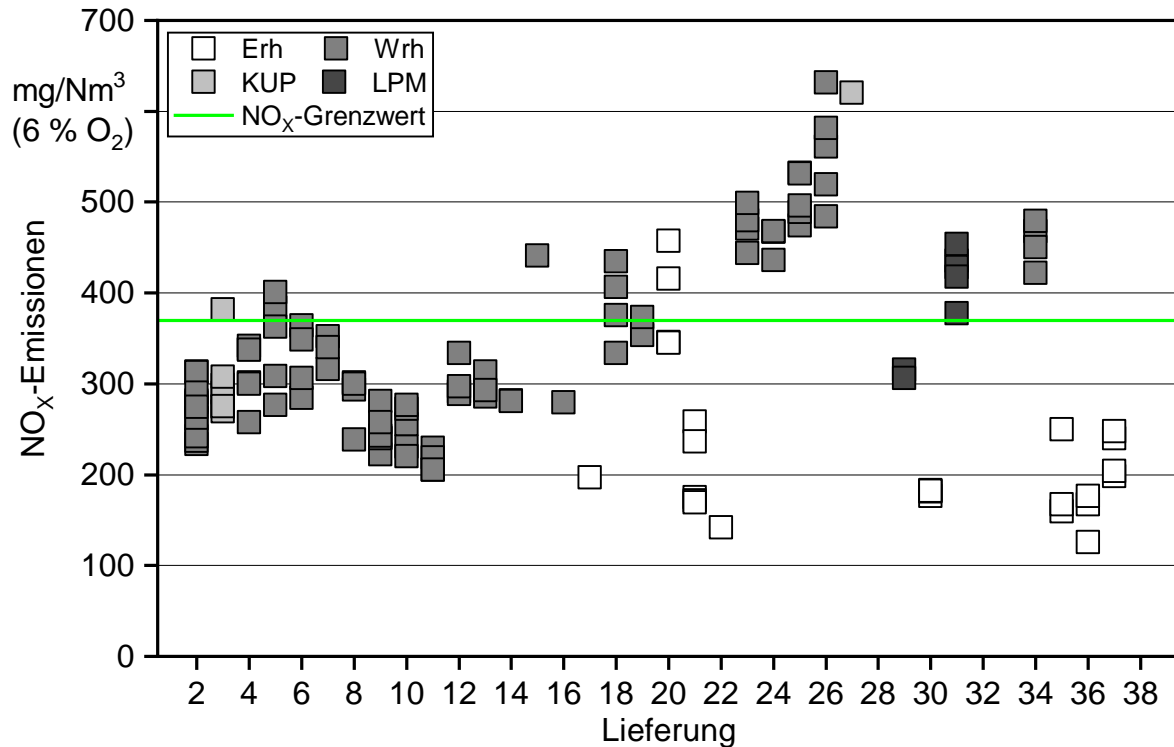


Abbildung 24: NO<sub>x</sub>-Emissionen für die verschiedenen Brennstofflieferungen für das TFZ-Heizwerk. Für die meisten Lieferungen wurden bei verschiedenen Leistungen die NO<sub>x</sub>-Emissionen bestimmt (Grenzwert: 44. BImSchV: 370 mg/Nm<sup>3</sup> bei 6 % O<sub>2</sub>)

Stellt man nun alle Ergebnisse in Abbildung 25 zusammen, so fällt auf, dass bei der Verwendung von Hackschnitzeln des ersten Lieferanten geringere NO<sub>x</sub>-Emissionen freigesetzt wurden als bei der Verwendung von Hackschnitzeln des zweiten Lieferanten. Insgesamt lagen die NO<sub>x</sub>-Emissionen während 55 % der Messdauer unterhalb des neuen NO<sub>x</sub>-Grenzwerts. Eine Ursache könnte im höheren Wassergehalt der Hackschnitzel von Lieferant 2 liegen, da hierdurch für eine ausreichende Verbrennungsgüte mehr Verbrennungsluft in der Brennkammer benötigt wird und so bei hohen Wassergehalten höhere Sauerstoffgehalte, insbesondere im Sekundärbrennraum, vorherrschen. Diese höheren Sauerstoffgehalte können wegen der somit schwächer ausgeprägten Reduktionszone zu höheren NO<sub>x</sub>-Emissionen führen [7], insbesondere wenn der höhere Wassergehalt dazu führt, dass die Gasverweilzeit der gebildeten Zwischenprodukte und die Temperaturen in der Reduktionszone insgesamt verringert sind. Hinzu kommt, dass die NO<sub>x</sub>-Bildung zusätzlich durch die Anwesenheit von Wasser unterstützt werden kann, weil das Wasser als Quelle von OH-Radikalen die Stickstoffoxidation verstärken kann [7]. Diese beiden Zusammenhänge scheinen sich in den Ergebnissen in Abbildung 26 zu bestätigen, da hier mit steigendem Wassergehalt im Brennstoff auch der Restsauerstoffgehalt im Abgas zunimmt. Ebenso fällt der Restsauerstoffgehalt im Abgas unter Teillastbedingungen höher aus als bei Nennlast. Durch eine gezielte Anpassung der Kesselein- stellung an den Brennstoffwassergehalt und eine damit erfolgte Regelung der Verbrennungsluftzufuhr könnten die NO<sub>x</sub>-Emissionen reduziert werden.

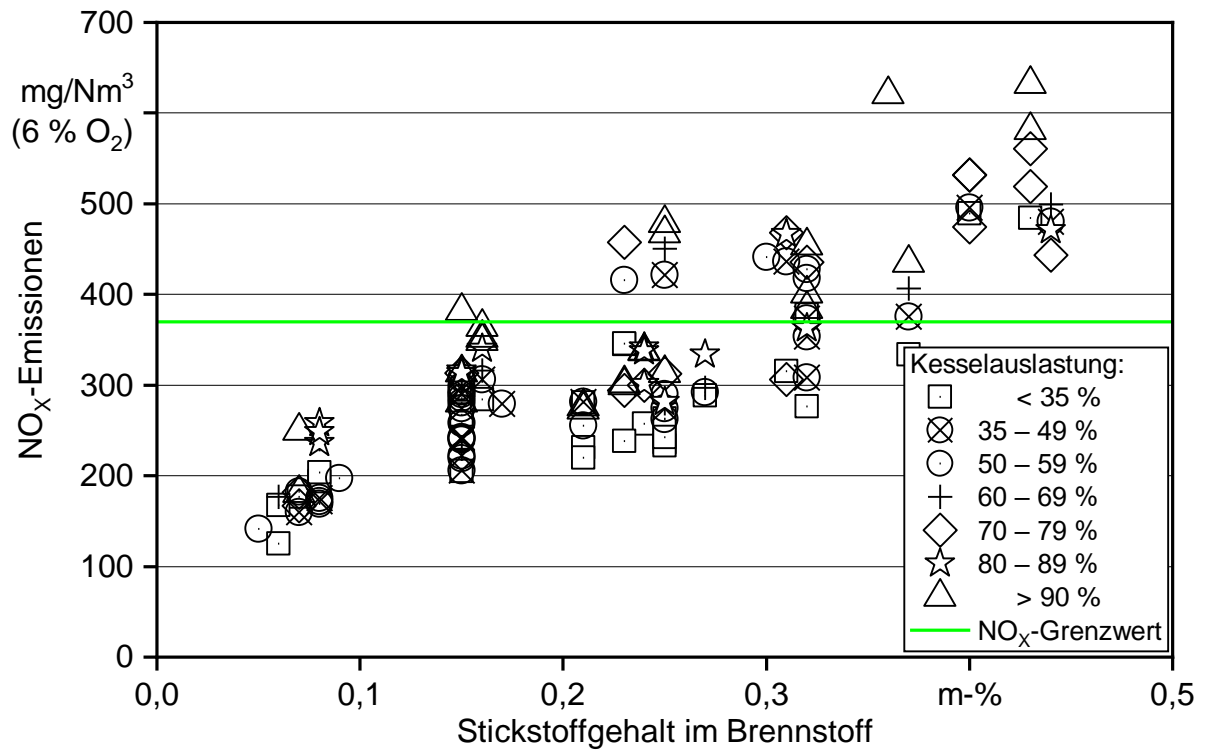


Abbildung 25: Abhängigkeit der Stickstoffoxidemissionen vom Stickstoffgehalt aller Brennstoffe (bezogen auf die Trockenmasse) bei unterschiedlichen Kesselauslastungen am TFZ-Heizwerk (Grenzwert: 44. BImSchV: 370 mg/Nm<sup>3</sup> bei 6 % O<sub>2</sub>)

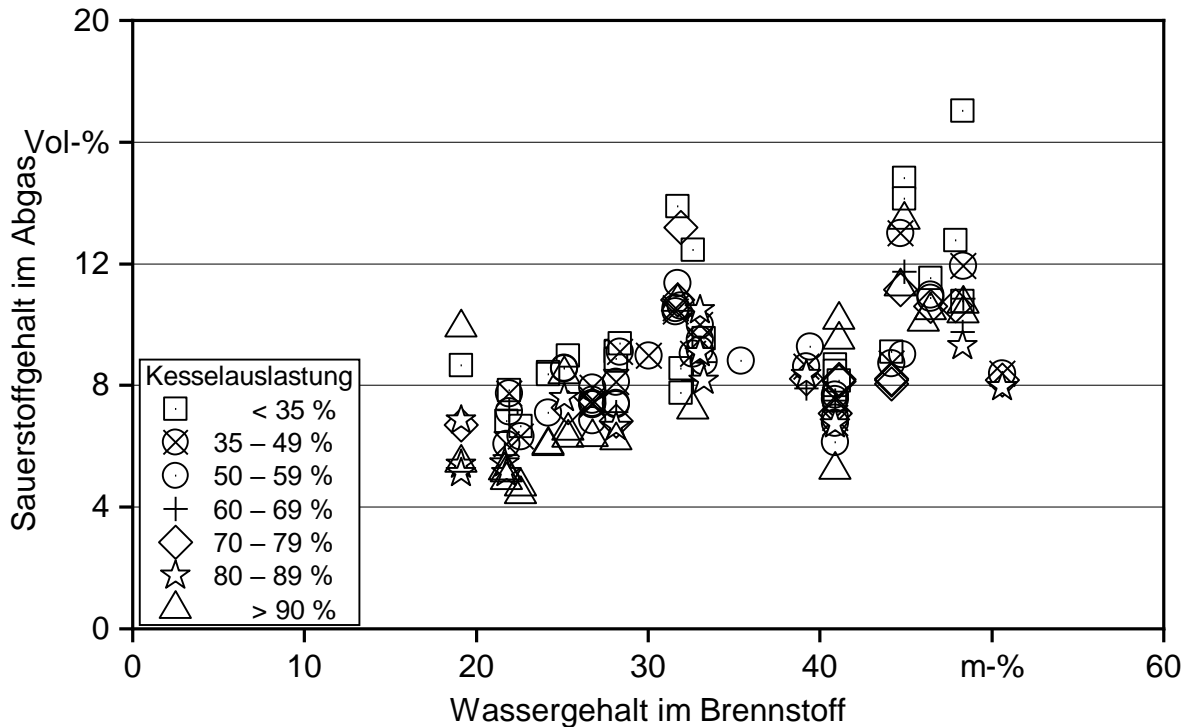


Abbildung 26: Restsauerstoffgehalt im Abgas in Abhängigkeit vom Brennstoffwassergehalt und von der Kesselauslastung am TFZ-Heizwerk

### 3.3.2 Kohlenmonoxidemissionen

Die Kohlenmonoxidemissionen werden zukünftig im Rahmen der 44. BImSchV bei  $220 \text{ mg/Nm}^3$  begrenzt sein (siehe Tabelle 1). Daher wurden für die Hackschnitzellieferungen auch die CO-Emissionen bei unterschiedlichen Kesselauslastungen ermittelt, was in Abbildung 27 veranschaulicht wird. Jeder Messpunkt fasst dabei unterschiedlich lange Messdauern bei einer bestimmten Kesselauslastung zusammen. Hierbei sei angemerkt, dass die CO-Emissionen tendenziell geringer ausfielen mit zunehmender Kesselauslastung. Weiterhin fällt auf, dass für die erste Lieferung von KUP-Hackschnitzeln die CO-Emissionen unterhalb des neuen Grenzwerts lagen, während dieser bei Lieferung 27 aufgrund eines höheren Wassergehalts deutlich überschritten wurde.

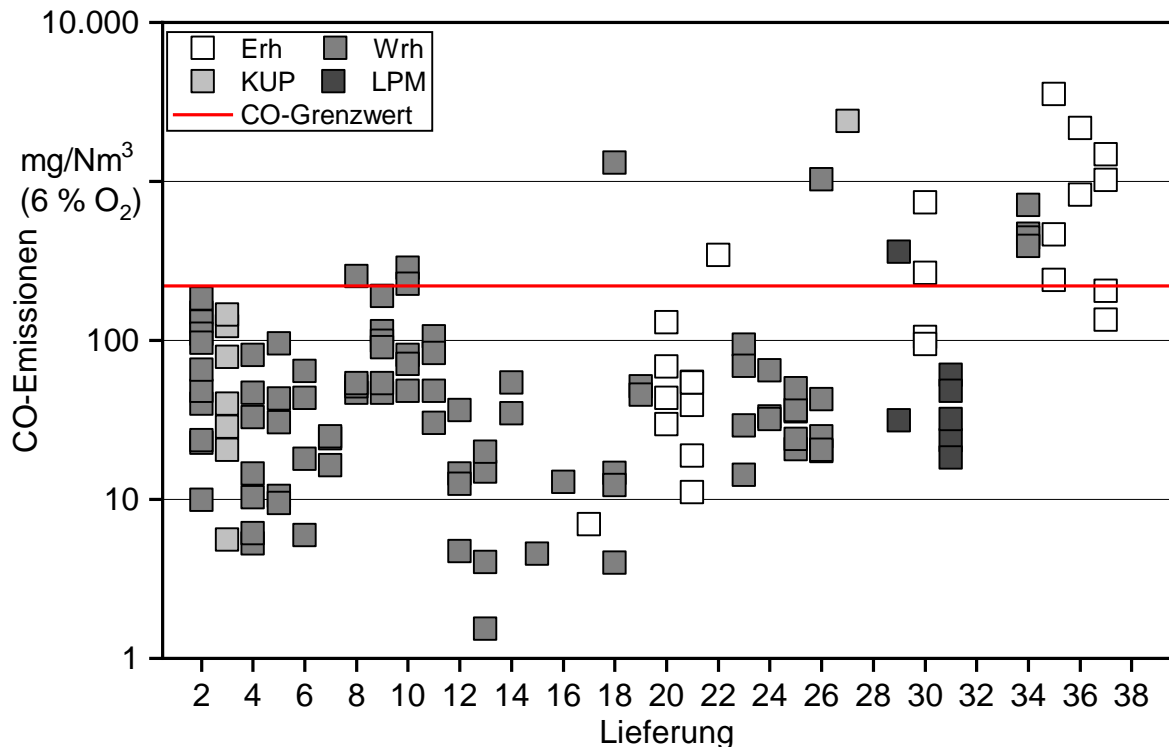


Abbildung 27: CO-Emissionen für die verschiedenen Hackschnitzzellieferungen am TFZ-Heizwerk (CO-Grenzwert: 44. BImSchV: 220 mg/Nm<sup>3</sup> bei 6 % O<sub>2</sub>)

Die festgestellten CO-Emissionen in Abhängigkeit vom Brennstoffwassergehalt sind in Abbildung 28 zusammengestellt. Wie bei den Kleinfeuerungsanlagen zeigt sich, dass die CO-Emissionen mit steigendem Wassergehalt tendenziell zunehmen [13]. Bei Wassergehalten von unter ca. 30 m-% wird der neue CO-Grenzwert bei jeder Kesselauslastung eingehalten. Für Wassergehalte über 45 m-% sind CO-Emissionen zwischen 7 mg/Nm<sup>3</sup> und 3.500 mg/Nm<sup>3</sup> möglich. In diesem Bereich lieferte das Hackschnitzelsortiment 17 die niedrigsten CO-Emissionen. Im Gegensatz dazu verursachten die Lieferungen 36 und 37 deutlich erhöhte CO-Emissionen, was jedoch vermutlich an der hier versuchsweise bewusst durchgeführten Deaktivierung der Rezirkulationsluft lag.

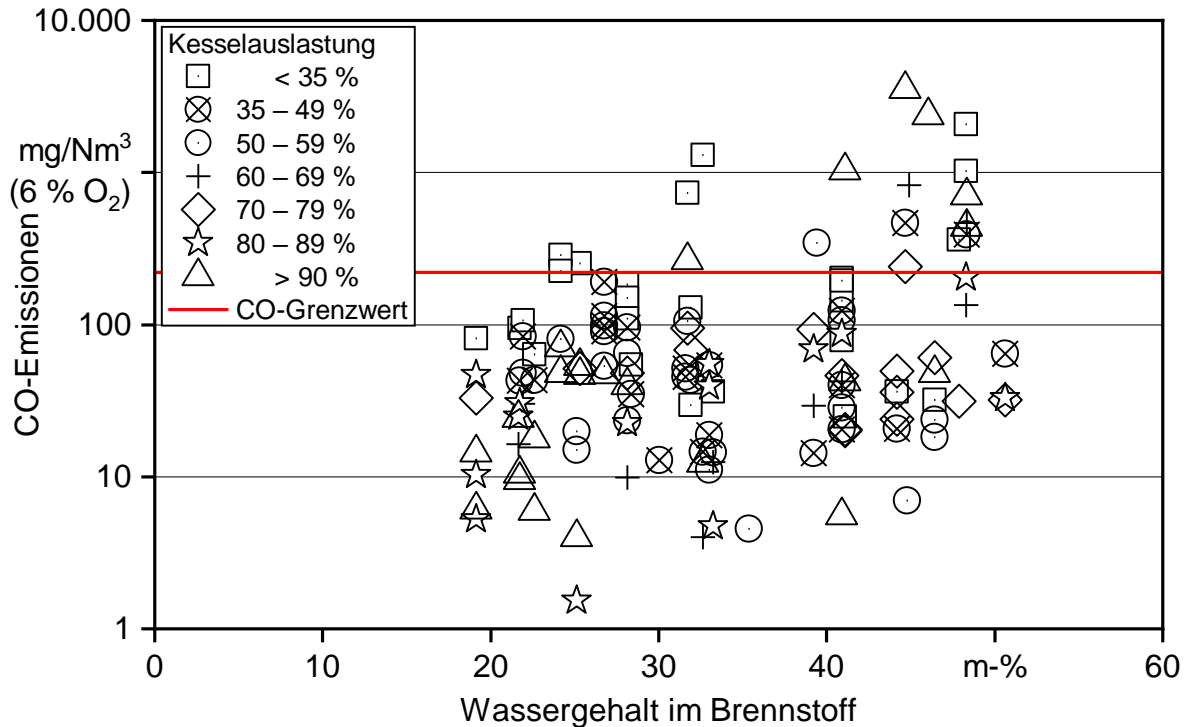
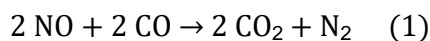


Abbildung 28: CO-Emissionen in Abhängigkeit vom Brennstoffwassergehalt und von der Kesselauslastung am TFZ-Heizwerk (Grenzwert: 44. BImSchV: 220 mg/Nm<sup>3</sup> bei 6 % O<sub>2</sub>)

CO und NO<sub>x</sub> verlaufen häufig gegensätzlich. Das liegt daran, dass im Verbrennungsverlauf bereits gebildetes NO auch als Oxidationsmittel für andere vorhandene unverbrannte Substanzen (CO, C<sub>org</sub>, H<sub>2</sub>) wirken kann und dabei selbst zu elementarem Stickstoff (N<sub>2</sub>) reduziert wird. Die nachstehende Gleichung (1) erläutert diesen Zusammenhang am Beispiel von CO.



Zur Prüfung, inwieweit dieser Zusammenhang auch in der vorliegenden Untersuchung eine Rolle spielt, sind beide Komponenten in Abbildung 29 gegenübergestellt. Allerdings lässt sich aus der Darstellung keine klare Korrelation ableiten, auch weil der erwartete Zusammenhang von den oben genannten Effekten des ebenfalls sehr variablen Wassergehalts überlagert sein dürfte (vgl. Abschnitt 3.3.1).

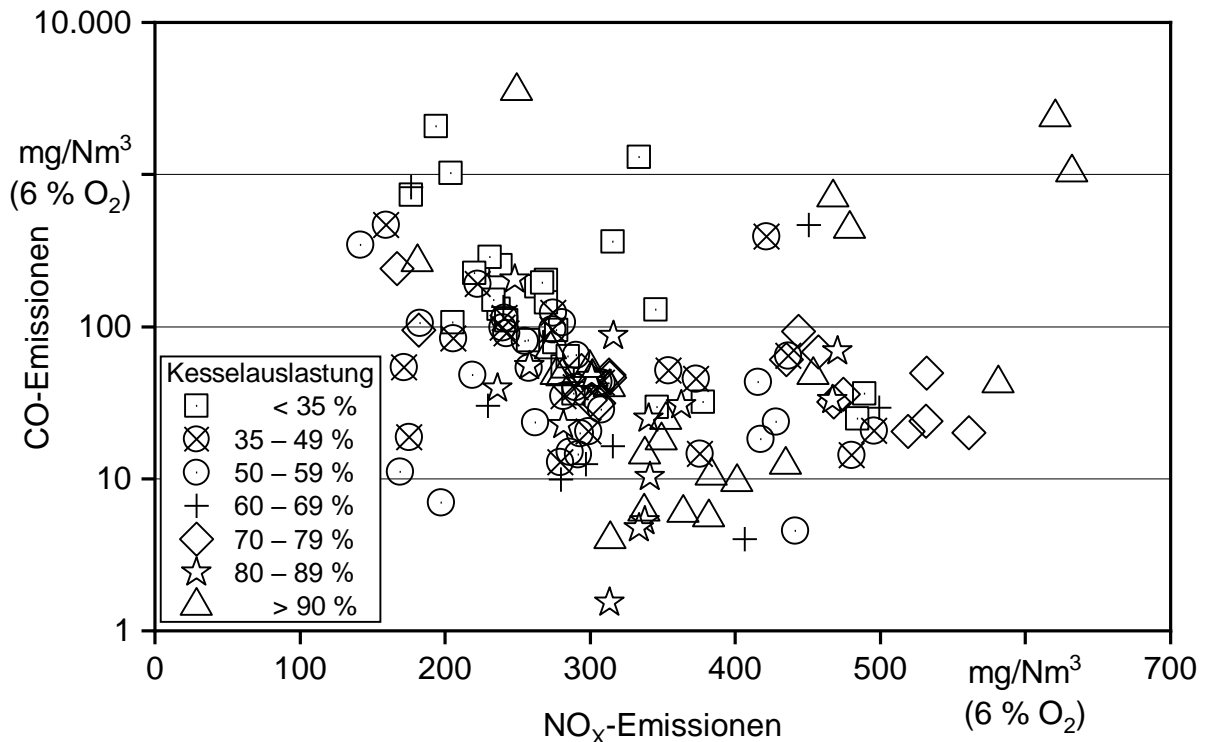


Abbildung 29: CO-Emissionen in Abhängigkeit von den NO<sub>x</sub>-Emissionen am TFZ-Heizwerk

Folgende Maßnahmen zur Einhaltung des CO-Grenzwerts in allen Lastbereichen können für das Fallbeispiel des TFZ-Heizwerks empfohlen werden:

- Bessere Einbindung des TFZ-Heizwerks in das vorhandene Nahwärmenetz, um die erzeugte Wärme besser einspeisen zu können und dadurch den Anteil der Teillastphasen zu verringern. Während der Emissionsmessungen war die Pumpe für die Wärmeeinspeisung in das Nahwärmenetz zu klein dimensioniert, sodass die Kessel nicht ihre volle Leistung einspeisen konnten. Diese Pumpe soll durch eine leistungsfähigere Pumpe ersetzt werden, um die Kesselauslastung zu verbessern.
- Beide Kessel sind identisch bezüglich der Wärmeleistung. Hier wäre die Verwendung zweier Kessel mit unterschiedlicher Leistung zu empfehlen, sodass ein Kessel immer als Grundlastkessel, optimalerweise im Nennlastbetrieb, laufen könnte, während der zweite Kessel zum Abdecken der Spitzenlast eingesetzt würde.
- Eine gezielte Anpassung der Kesseleinstellung an den wechselnden Brennstoffwassergehalt und eine damit einhergehende Regelung der Verbrennungsluftzufuhr.

### 3.3.3 Schwefeldioxidemissionen

Der im Brennstoff vorhandene Schwefelgehalt wurde nicht durchgehend, sondern nur für 17 Brennstofflieferungen bestimmt, da in naturbelassenen Hackschnitzeln mit einem geringen Gehalt zu rechnen ist. Parallel zum Einsatz dieser Brennstoffe erfolgte die Aufzeichnung der Schwefeldioxidemissionen (SO<sub>2</sub>), die in Abhängigkeit vom Schwefelgehalt

im Brennstoff in Abbildung 30 dargestellt sind. Es ist nicht zu erkennen, dass die  $\text{SO}_2$ -Emissionen mit zunehmendem Schwefelgehalt im Brennstoff ansteigen, da der Schwefelgehalt insgesamt auf einem sehr niedrigen Niveau liegt. Ein Emissionsgrenzwert ist in diesem Leistungsbereich mit Holzbrennstoffen auch zukünftig nicht vorgesehen.

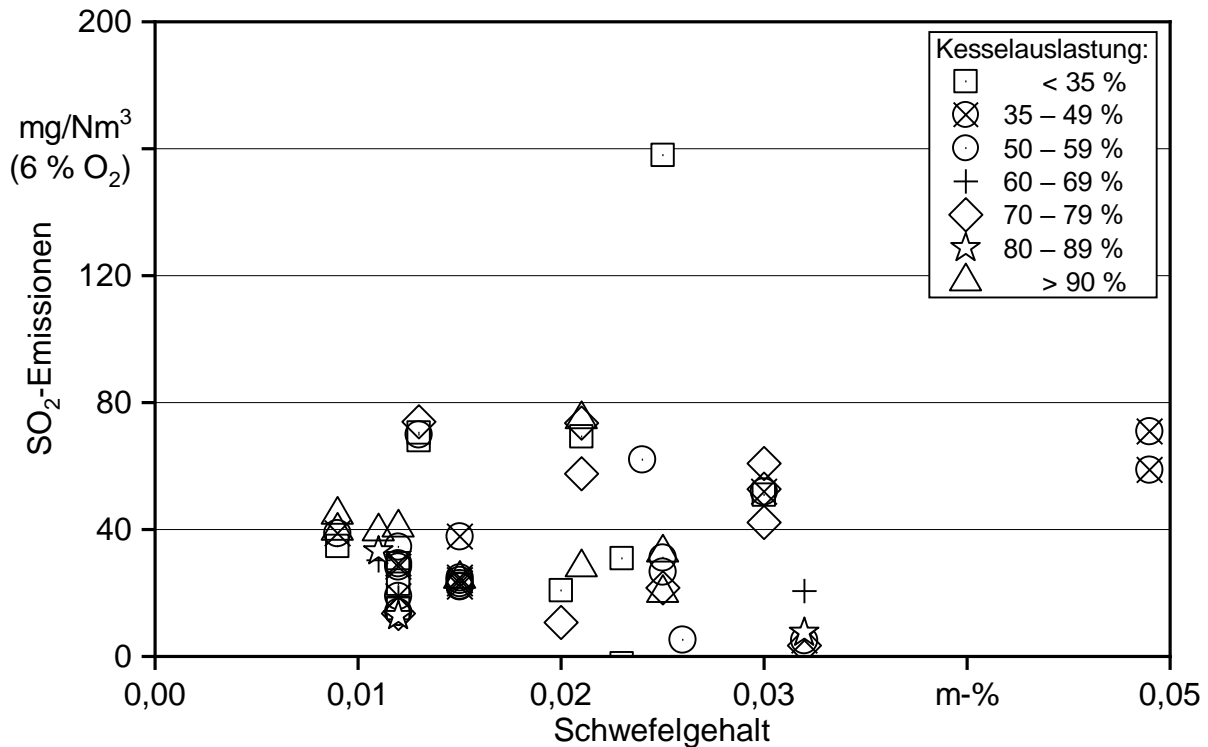


Abbildung 30:  $\text{SO}_2$ -Emissionen in Abhängigkeit vom Schwefelgehalt im Brennstoff für ausgewählte Hackschnitzelsortimente für das TFZ-Heizwerk

### 3.3.4 Gesamtstaubemissionen

Für einige Brennstofflieferungen wurden die Gesamtstaubemissionen ermittelt, um eine grobe Orientierung über die mögliche Schwankungsbreite dieser Abgaskomponente zu geben. Für jedes Sortiment erfolgte für mindestens eine Brennstofflieferung die Gesamtstaubbestimmung mit dem Staubmessgerät Wöhler SM 500, das für Überwachungsmessungen nach 1. BImSchV eingesetzt werden kann.

Die Ergebnisse zeigt Abbildung 31. Bei den hier aufgezeigten Messwerten handelt es sich um die tatsächlich gemessenen Gesamtstaubwerte ohne Abzug der 40 % Messunsicherheit, jedoch bezogen auf 6 % Sauerstoffgehalt im Abgas. Für das Energierundholz aus Lieferung 20 wurden Staubwerte von durchschnittlich  $66 \text{ mg/Nm}^3$  ermittelt. Die Gesamtstaubemissionen der vier Sortimente aus Waldrestholz lagen zwischen  $40 \text{ mg/Nm}^3$  und  $55 \text{ mg/Nm}^3$ . Für die erste Pappelhackschnitzzellieferung wurden Gesamtstaubemissionen in Höhe von durchschnittlich  $52 \text{ mg/Nm}^3$  ermittelt, dieser Wert liegt somit im Bereich vom Waldrestholz. Jedoch wurden für das zweite Pappelsortiment deutlich höhere Gesamtstaubemissionen von ca.  $117 \text{ mg/Nm}^3$  nachgewiesen, was auch durch frühere Messungen mit KUP-Brennstoff am TFZ-Heizwerk aus dem Jahr 2016 bestätigt wird [8].



Die mit Abstand höchsten Gesamtstaubemissionen wurden für die zweite Lieferung des Landschaftspflegeholzes (das gesiebte Material) mit Werten von  $544 \text{ mg/Nm}^3$  bis  $1.142 \text{ mg/Nm}^3$  beobachtet. Während der Messungen lagen aber die CO-Emissionen bei unter  $30 \text{ mg/Nm}^3$  und belegten somit einen grundsätzlich guten Ausbrand der Abgase. Ein solch auffälliges Verhalten bezüglich der Gesamtstaubemissionen für Landschaftspflegeholz war bisher in dieser Größenordnung bei Hackgutkesseln mit 50 bzw. 100 kW Leistung im Feuerungsprüfstand des TFZ noch nicht beobachtet worden [9].

Für diese hohen Staubemissionen können mehrere Ursachen verantwortlich sein. Zum einen erscheint eine Fehlfunktion der Multizyklon-Entstaubungsanlage möglich. Zum anderen kann der Spitzenwert auch mit dem hohen Aschegehalt und somit mit dem nicht zu vernachlässigenden Anteil an Bodenmaterial im Brennstoff zusammenhängen. Aktuelle Untersuchungen des TFZ zeigen, dass Holzhackschnitzel mit Verunreinigung durch Bodenmaterial zu höheren Gesamtstaubemissionen neigen, bei verminderten CO-Emissionen. Durch die Rostbewegung können hier Partikel mit dem Abgasstrom mitgerissen werden, die nicht vollständig über den Zyklon abgeschieden werden. Auch ist ein Gerätedefekt denkbar. Es wäre sinnvoll, die Gesamtstaubmessungen bei einer erneuten Lieferung von Landschaftspflegematerial für das TFZ-Heizwerk zu wiederholen.

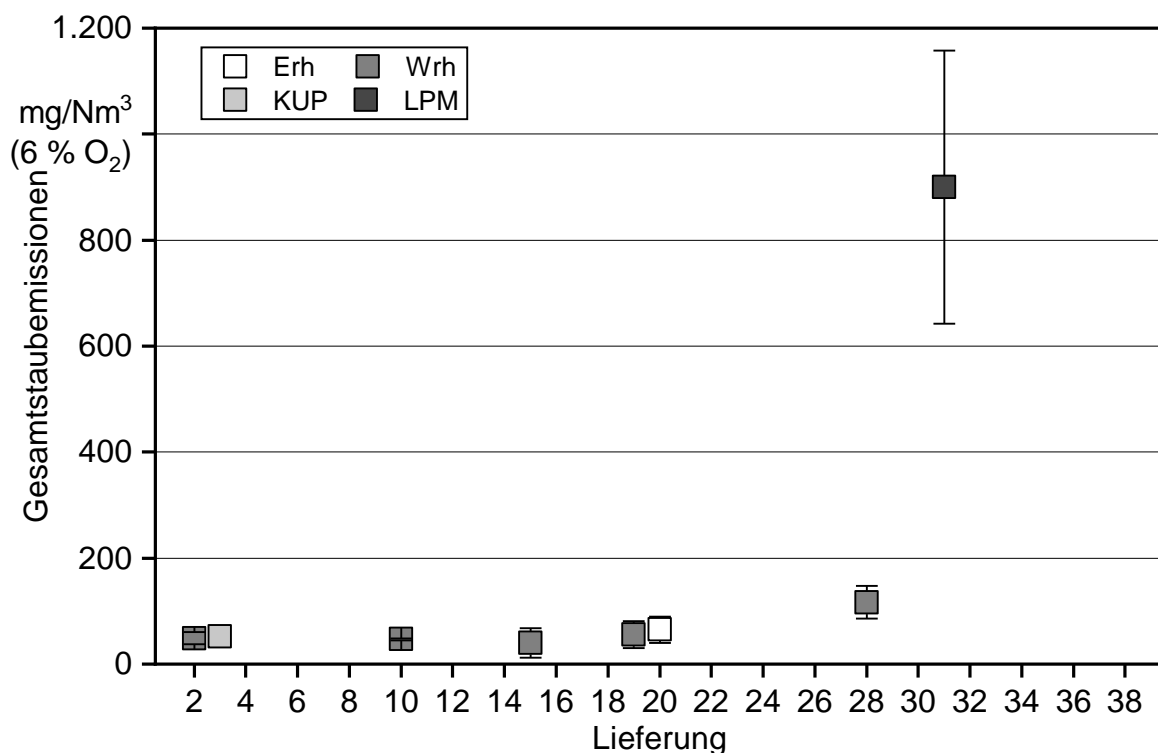


Abbildung 31: Gesamtstaubemissionen für ausgewählte Hackschnitzellieferungen am TFZ-Heizwerk

Einen linearen Zusammenhang der Gesamtstaubemission mit dem Gehalt der aerosolbildenden Elemente Kalium und Natrium konnte bei diesen Hackschnitzelsortimenten nicht bestätigt werden (siehe Abbildung 32).

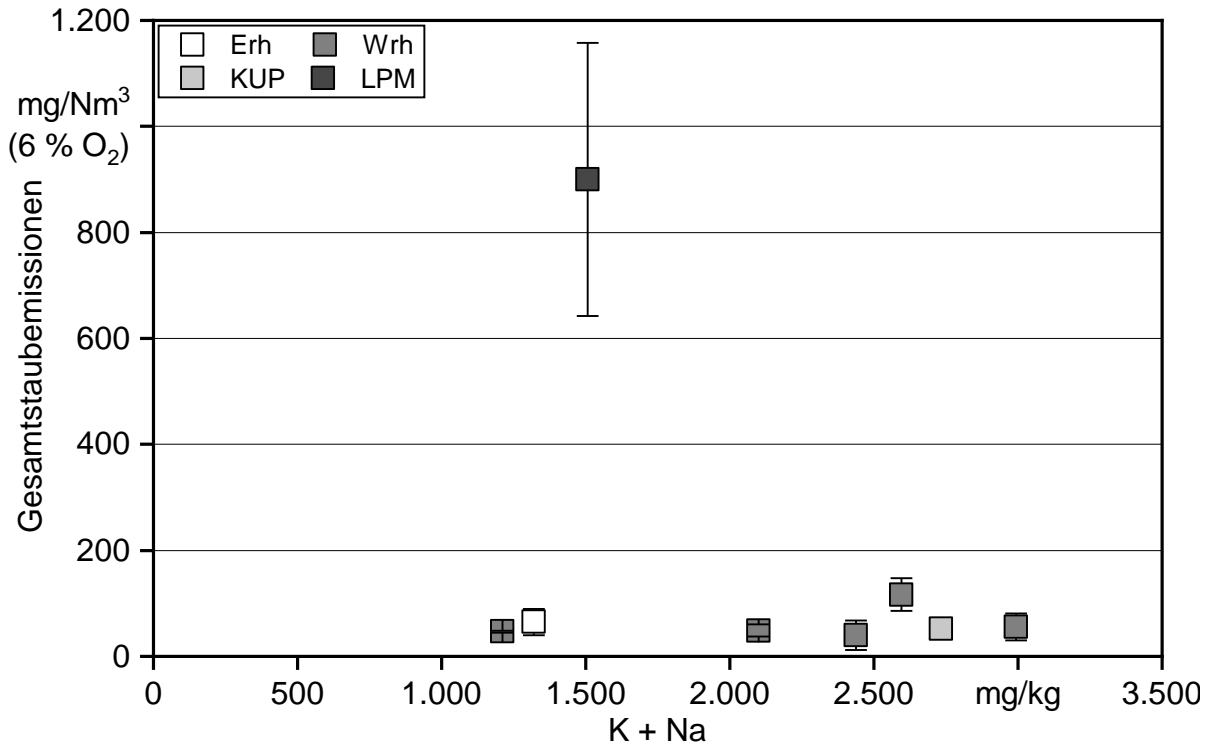


Abbildung 32: Abhängigkeit der Gesamtstaubemissionen von den Aerosolbildnern Kalium und Natrium (bezogen auf Trockenmasse) am TFZ-Heizwerk

### 3.4 Emissionsverhalten bei der Feldanlage 1

Die Emissionen an der ersten Feldanlage wurden über zwei Betriebstage aufgezeichnet, sie sind in Abbildung 33 dargestellt. Am Verlauf der Brennraumtemperatur ist zu erkennen, dass diese Anlage, die mit Sägespänen (0,06 m-% Stickstoffgehalt) betrieben wird, keinen stationären Betrieb ansteuert, denn sobald eine vorgegebene Vorlauf­temperatur erreicht wird, schaltet sich die Anlage ab und geht in den Gluterhalt über. Dies ist an dem damit verbundenen deutlichen Anstieg der CO-Emissionen erkennbar. Die CO-Emissionen schwanken zwischen 0 mg/Nm<sup>3</sup> und 3.000 mg/Nm<sup>3</sup> (bei 6 % O<sub>2</sub>) und liegen durchschnittlich bei 537 mg/Nm<sup>3</sup>. Bezüglich der Stickstoffoxidemissionen konnte eine konsequente Einhaltung des neuen Grenzwerts in jedem Lastzustand nachgewiesen werden. Im circa einstündigen Voll­lastbetrieb der Anlage lagen die NO<sub>x</sub>-Emissionen bei durchschnittlich 190 mg/Nm<sup>3</sup>.

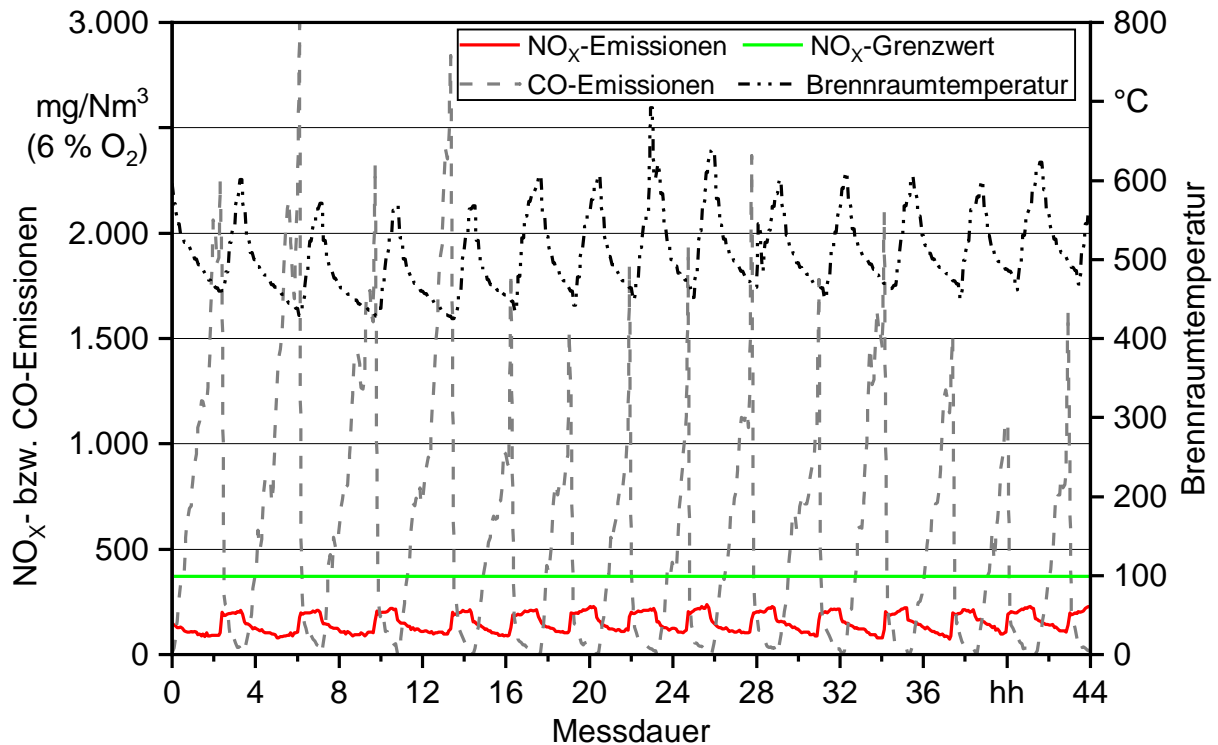


Abbildung 33: Zeitlicher Verlauf der CO- und NO<sub>x</sub>-Emissionen an Feldanlage 1 über zwei Messtage (NO<sub>x</sub>-Grenzwert: 44. BImSchV: 370 mg/Nm<sup>3</sup> bei 6 % O<sub>2</sub>)

An dieser Feldanlage wurden drei Gesamtstaubmessungen mit dem Staubmessgerät Wöhler SM 500 durchgeführt. Die Messwerte rangierten von 56 bis 73 mg/Nm<sup>3</sup>, bezogen auf 6 % O<sub>2</sub>.

### 3.5 Emissionsverhalten bei der Feldanlage 2

Bei der zweiten Feldanlage wurden die Messgeräte am Vormittag aufgebaut, sodass ab Mittag die Emissionsmessungen durchgeführt werden konnten. Der zeitliche Verlauf der CO- und NO<sub>x</sub>-Emissionen ist in Abbildung 34 dargestellt. Die CO-Emissionen schwankten zwischen 6 mg/Nm<sup>3</sup> und 321 mg/Nm<sup>3</sup> und lagen durchschnittlich bei 37 mg/Nm<sup>3</sup>. Bezüglich der NO<sub>x</sub>-Emissionen ist festzustellen, dass diese in circa der Hälfte der Messzeit unterhalb des neuen Grenzwerts lagen. Gegen Mitte der Messdauer konnten die Grenzwerte auch über einen längeren Zeitraum eingehalten werden. Deutliche Überschreitungen mit NO<sub>x</sub>-Werten von fast 500 mg/Nm<sup>3</sup> wurden aber gegen Ende der Messzeit festgestellt. Inwieweit diese Messschwankungen mit variierenden Anlageneinstellungen zu begründen sind, kann nicht festgestellt werden, da die Rohdaten vom Anlagenbetreiber zum Zeitpunkt der Berichtserstattung nicht zur Verfügung standen. Auch ist festzuhalten, dass mit diesen Hackschnitzeln, die einen Stickstoffgehalt von durchschnittlich 0,43 m-% aufwiesen, geringere NO<sub>x</sub>-Emissionen gemessen wurden als mit vergleichbaren Stickstoffgehalten am TFZ-Heizwerk. Die Gesamtstaubemissionen lagen durchschnittlich bei 31 mg/Nm<sup>3</sup> (zwischen 24 und 45 mg/Nm<sup>3</sup>), bezogen auf 6 % O<sub>2</sub>.

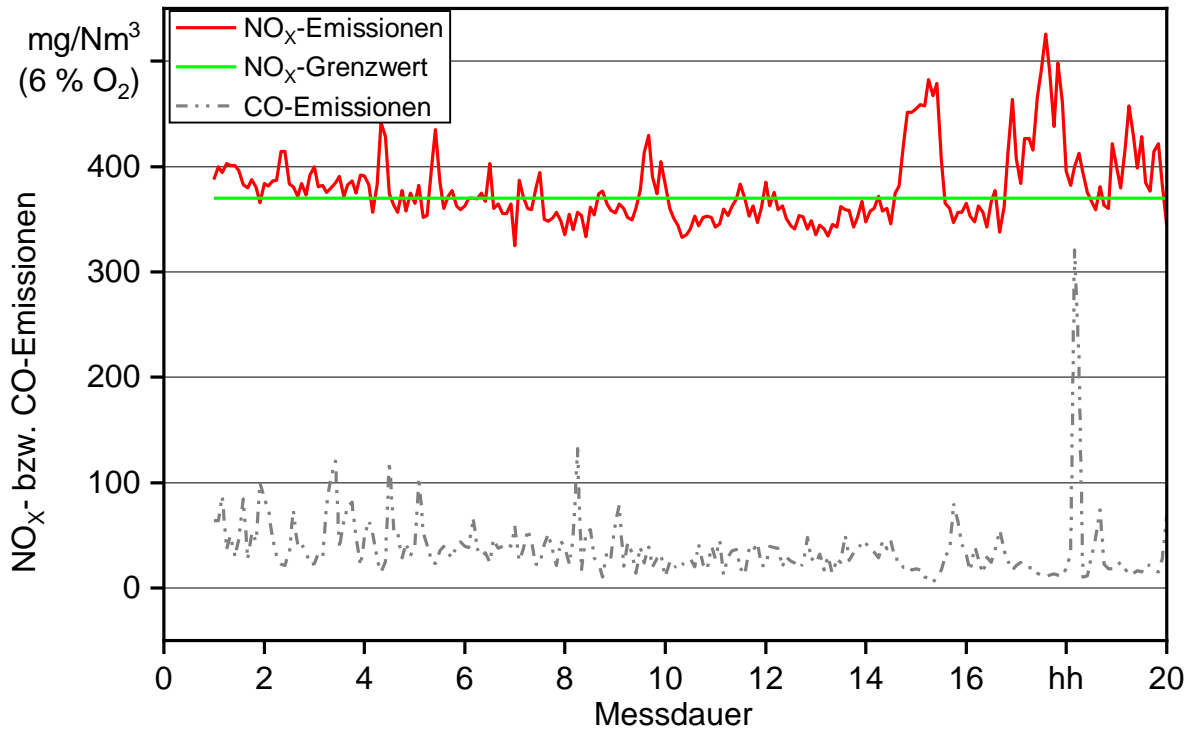


Abbildung 34: Zeitlicher Verlauf der CO- und NO<sub>x</sub>-Emissionen an Feldanlage 2 über einen Messtag (NO<sub>x</sub>-Grenzwert: 44. BlmSchV: 370 mg/Nm<sup>3</sup> bei 6 % O<sub>2</sub>)

## Zusammenfassung

Im Rahmen der Überführung der MCP-Richtlinie in die 44. BImSchV werden die Grenzwerte bezüglich der Stickstoffoxide von Feuerungsanlagen zwischen 1 MW und 50 MW neu geregelt. Um hier eine Datenbasis für Feuerungsanlagen zwischen 1 MW und 5 MW zu schaffen, erfolgten eine Langzeitmessung der Emissionen am TFZ-Heizwerk sowie eintägige Messungen an zwei Feldanlagen.

Während des Langzeitmonitorings am Heizwerk des Technologie- und Förderzentrums im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ) wurden 39 Hackschnitzzellieferungen beprobt und entsprechend den geltenden Prüfnormen auf physikalische Kenngrößen und wichtige Elemente (C, H, N, S, Cl, Al, Mg, K, Na, P, Si, Fe) analysiert. Das Heizwerk wurde von zwei Hauptlieferanten mit vier verschiedenen Hackschnitzelsortimenten versorgt: Energierundholz, Waldrestholz, Kurzumtriebsplantagenholz (KUP, Pappel) und Landschaftspflegematerial. Das erste Augenmerk lag somit auf der Feststellung der Bandbreite, in der die jeweiligen Brennstoff-Qualitätsparameter bei Heizwerken dieser Größenordnung im Saisonablauf schwanken können, wobei die Hinzunahme des brennstofftechnisch schwierigen KUP-Brennstoffs eher untypisch ist und lediglich für Forschungszwecke erfolgte. Beim Wassergehalt beispielsweise ergab sich eine Spanne über alle Sortimente von 19 m-% bis 51 m-% (Mittelwert: 36 m-%), beim Aschegehalt lag die Spanne bei 0,2 m-% bis 5,8 m-% (Mittelwert: 1,8 m-%). Die Heizwerte der Trockenmasse über alle Sortimente schwankten weniger, sie lagen zwischen 18,0 MJ/kg und 19,7 MJ/kg (Mittelwert: 19,1 MJ/kg). Der Stickstoffgehalt lag bei einer Spanne von 0,05 m-% bis 0,44 m-% (Mittelwert: 0,23 m-%), während die Kaliumgehalte von 400 mg/kg bis 3.100 mg/kg schwankten (Mittelwert: 1.567 mg/kg). Je größer der Feinanteil im Brennstoff war (d. h. Siebdurchgang bis 3,15 mm Lochdurchmesser), desto höher war auch der Stickstoffgehalt. Eine ähnliche Korrelation zeigte sich auch zwischen dem Feingehalt und dem Aschegehalt.

Die mit den angelieferten Brennstoffen am TFZ durchgeführten Emissionsmessungen erfolgten an jeweils einem der beiden baugleichen 650-kW-Kessel mit horizontalem Vorschubrost, gestufter Verbrennungsluftzufuhr, Abgasrezirkulation und Multizyklonabscheider. Die Ergebnisse zeigen, in welchem Umfang sich Veränderungen im Stickstoffgehalt im Brennstoff direkt auf die Höhe der Stickstoffoxidemissionen auswirken. Ebenso haben die Kesselauslastung und der Brennstoffwassergehalt einen direkten bzw. indirekten Einfluss auf die NO<sub>x</sub>-Emissionen.

Mit Hackschnitzeln aus Energierundholz konnte am TFZ-Heizwerk in jeder Leistungsklasse der neue Grenzwert für NO<sub>x</sub>-Emissionen nach 44. BImSchV eingehalten werden, da hier der Stickstoffgehalt im Brennstoff meist unter 0,1 m-% lag. Für Hackschnitzelchargen mit einem Stickstoffgehalt von 0,4 m-% und darüber (z. B. drei verschiedene Waldresthölzer und einmal KUP) wurde der NO<sub>x</sub>-Grenzwert von 370 mg/Nm<sup>3</sup> in allen Laststufen überschritten.

Der Wassergehalt hatte ebenfalls einen Einfluss auf die Stickstoffoxidemissionen. Bei Hackschnitzeln mit einem vergleichbaren Brennstoffstickstoffgehalt und bei ähnlicher

Kesselauslastung führte ein höherer Wassergehalt zu höheren Stickstoffoxidemissionen. Allerdings muss erwähnt werden, dass der Kessel – praxisüblich – nicht eigens auf jedes neue Hackschnitzelsortiment eingestellt wurde, weshalb der Luftüberschuss mit feuchteren Brennstoffen insgesamt anstieg und so die Bedingungen für eine wirksame NO<sub>x</sub>-Minderung in der Reduktionszone des Brennraums verschlechterte. Bei Beibehaltung des Brennstoffsortiments kann somit eine Reduzierung der NO<sub>x</sub>-Emissionen entweder durch eine gezielte und ggf. automatisierte Anpassung an den aktuellen Wassergehalt erfolgen, oder der Wassergehalt des Brennstoffs wird bereits bei der Hackschnitzelbeschaffung begrenzt bzw. durch eigene qualitätssichernde Maßnahmen (z. B. Trocknung, Belüftung) vereinheitlicht.

Neben den Langzeitmessungen am TFZ-eigenen Heizwerk fanden Felduntersuchungen an zwei weiteren Hackschnitzel-Heizwerken statt. Hierbei handelte es sich um ein Heizwerk der Holzverarbeitenden Industrie (1,5-MW-Unterschubfeuerung für Holzspäne, Feldanlage 1 von 1973) sowie um die Beheizung eines Krankenhausbetriebs in Bayern (4-MW-Treppenvorschubrostfeuerung für Hackschnitzel, Feldanlage 2 von 2004).

Die Ergebnisse zeigen ein uneinheitliches Bild. Bei Feldanlage 1 wird der NO<sub>x</sub>-Grenzwert wegen des niedrigen Brennstoffstickstoffgehalts von 0,06 m-% stets eingehalten. Im Zuge der Umsetzung in die 44. BImSchV jedoch könnten hier die Ausbrandphasen bezüglich der CO-Emissionen problematisch werden, denn dann müssen die Grenzwerte in allen Betriebszuständen eingehalten werden. Feldanlage 2 verwendet zwei relativ stickstoffhaltige Hackschnitzelbrennstoffe (N-Gehalt: 0,37 bzw. 0,47 m-%), deren Emissionen – wie beim TFZ-Heizwerk – um den Grenzwert schwanken und ihn teilweise überschreiten. Für solche stickstoffhaltigen Brennstoffe besteht weitgehend Übereinstimmung mit den NO<sub>x</sub>-Emissionswerten am TFZ-Heizwerk.

Als allgemeine, stark vereinfachte Beobachtung kann abschließend festgestellt werden, dass sich helle Hackschnitzel (meist aus Energierundholz) oder nur wenig dunklere Hackschnitzel durch Stickstoffgehalte von weniger als 0,2 m-% auszeichnen. Werden jedoch sehr dunkle Hackschnitzel mit einem hohen Feingehalt geliefert (z. B. mit hohem Rindenanteil oder vielen Nadeln), kann von höheren Stickstoffgehalten im Brennstoff ausgegangen werden, was ggf. zu Überschreitungen der NO<sub>x</sub>-Grenzwerte führen kann.

## Abstract/Summary

The medium combustion plant directive (MCPD) is now being transferred into German law, it is relevant for combustion plants with a thermal heat output between 1 MW and 50 MW. Within this regulation, flue gas emissions (CO, NO<sub>x</sub> and PM) will be limited to certain values depending on the thermal heat output of the plant. Especially for combustion plants with a heat output from 1 MW to 5 MW there is a lack of knowledge concerning the variability in the formation of NO<sub>x</sub> emissions as caused by the usual variation of fuel properties during a complete heating season. Therefore, the major fuel parameter in focus of this study was the nitrogen content in the fuel.

During a long term monitoring over a full heating season at the heating plant of the Technology and Support Centre for Renewable Raw Materials (TFZ), 39 wood chip deliveries were sampled and assessed according to standard test methods for biomass fuels. The chosen fuel parameters were main physical mechanical properties and the most important element concentrations (C, H, N, S, Cl, Al, Mg, K, Na, P, Si, Fe). The heating plant was supplied by two major fuel distributors providing four different wood chip assortments: energy round wood chips, forest residue chips, short rotation coppice (SRC-chips from poplar) and chips from landscape conservation material.

Initial focus was set on identifying the typical bandwidth of fuel quality variation, which can prevail over a heating season among fuels as used in a heating plant having the dimension of the one at TFZ (1,3 MW). The consideration of SRC fuels is, however, rather untypical and was only decided for research purposes.

Considering fuel moisture content, the bandwidth over all assortments was from 19 w-% to 51 w-% (mean: 35.6 w-%). For ash content it was from 0.2 w-% to 5.8 w-% (mean: 1.8 w-%). Calorific value varied between 18.0 MJ/kg and 19.7 MJ/kg dry basis (mean: 19.1 MJ/kg) and the fuel nitrogen content was in the range of 0.05 w-% and 0.44 w-% (mean: 0.23 w-%). Potassium content was between 400 mg/kg and 3,100 mg/kg (mean: 1,567 mg/kg). Fuel nitrogen content was positively correlated with the share of fines in the fuel (i.e. mass of all particles which pass a sieve with 3.15 mm round holes). Similarly, the ash content was also positively correlated with the share of fine fuel particles.

With the fuels supplied to TFZ, regular combustion operation was performed throughout the heating period starting from October 2018 until April 2019 when using one of the two 650 kW-boilers, which all applied a horizontal moving grate, staged combustion air supply, flue gas recirculation and a multi-cyclone particle precipitator. The results demonstrate the dimension in which a variation of fuel nitrogen content will directly influence the level of nitrogen-oxide emissions (NO<sub>x</sub>). Also the boiler heat output load and the fuel moisture content showed a direct or indirect impact on NO<sub>x</sub>-emissions.

With wood chips from energy round wood the NO<sub>x</sub> emission limits as specified in the new German directive "44. BImSchV" could always be met, as the fuel nitrogen content in energy round wood is mostly below 0.1 w-%. With wood chips having a fuel nitrogen content of 0.4 w-% or higher (here achieved with three different forest residue chips and

one SRC-chip delivery) the  $\text{NO}_x$ -limitation of  $370 \text{ mg/Nm}^3$  (based on 6 %  $\text{O}_2$ -concentration) was exceeded at all heating power levels.

Fuel moisture content also had an impact on  $\text{NO}_x$ -release. When wood chip fuels having a comparable N-concentration were used at similar heating power levels, an elevated moisture content would lead to increased  $\text{NO}_x$ -emissions. However, it should be mentioned that the boiler had not been adjusted to each newly delivered fuel or fuel moisture - as this reflects the usual practice. Thus, the oxygen supply ( $\lambda$  value) automatically increased when fuel moisture content was higher. This had the consequence that the conditions for an effective  $\text{NO}_x$ -mitigation in the reduction zone of the boiler declined. Thus, when the fuel assortment shall not be changed, such  $\text{NO}_x$ -emission peaks can only be tackled either by manual or automated adjustment to the given fuel moisture content, by limiting it via other quality assurance measures (e.g. ventilation, drying), or by defining stricter contractual fuel specifications for the supplier.

Apart from the long term measurements performed at the TFZ plant, field tests were also conducted at two other wood chip fuelled heating plants. Field test site 1 was a 1.5 MW under-stoker furnace for saw dust and wood shavings which operated in the wood processing industry (dated from 1973), and field test site 2 was a heating plant for a hospital in Bavaria having a 4 MW moving grate furnace (dated from 2004).

The results from these field tests show an inconsistent picture. At field test site 1 using saw dust and wood shavings the  $\text{NO}_x$ -limits were always met. This was due to the low fuel nitrogen concentration of only 0.06 w-%. During the transformation from the old to the new German emission regulation ("44. BImSchV") it may however become difficult to meet the CO requirements during frequently occurring burnout phases in this boiler (i.e. amber sustaining mode), because in the "44. BImSchV" the emission limits shall then be met throughout all operational phases. But field test site 2 used two relatively nitrogen-rich wood chip fuels (N-concentration: 0.37 w-% and 0.47 w-%), and thus the  $\text{NO}_x$ -emissions varied around the new limit value, just as it had been observed at the TFZ plant when using similar N-rich fuels.

As a general and largely simplified observation it shall finally be concluded that light-coloured wood chips (mostly from energy round wood) or only slightly darker wood chips are usually characterized by a nitrogen concentration of less than 0.2 w-%. However, if very dark wood chips are supplied which also have a high share of fines, e.g. with high bark content with or many needles, a higher nitrogen concentration can be expected and this might lead to an exceeding of given  $\text{NO}_x$  limits.



## Quellenverzeichnis

- [1] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (2002): Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz – Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft. Internetfassung des BMU, 239 Seiten URL: <https://www.bmu.de/gesetz/erste-allgemeine-verwaltungsvorschrift-zum-bundes-immissionsschutzgesetz/> (Stand: Oktober 2019)
- [2] CARROLL, J. P.; FINNAN, J. M.; BIEDERMANN, F.; BRUNNER, T.; OBERNBERGER, I. (2015): Air staging to reduce emissions from energy crop combustion in small scale applications, *Fuel*, Jg. 155, S. 37–43
- [3] DEUTSCHER BUNDESTAG (2019): Verordnung zur Einführung der Verordnung über mittelgroße Feuerungs-, Gasturbinen- und Verbrennungsmotoranlagen sowie zur Änderung der Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen, vom 13. Juni 2019. Bundesgesetzblatt, Teil I, Jg. 70, Nr. 22, S. 804–828
- [4] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2014): DIN EN ISO 17225-4. Biogene Festbrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen – Teil 4: Einteilung von Holzhackschnitzeln. Berlin: Beuth-Verlag, 11 Seiten
- [5] EUROPÄISCHE UNION (2015): Richtlinie (EU) 2015/2193 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. November 2015 zur Begrenzung der Emissionen bestimmter Schadstoffe aus mittelgroßen Feuerungsanlagen in die Luft. Amtsblatt der Europäischen Union, Jg. 58, Nr. L 313, S. 1–19
- [6] GÖßWEIN, S.; HIENDLMEIER, S.; BORCHERT, H. (2018): Energieholzmarkt 2016 – Untersuchung des Energieholzmarktes in Bayern hinsichtlich Aufkommen und Verbrauch. Abschlussbericht 05/2018. Freising: Bayerische Landesanstalt für Wald und Forsten, 131 Seiten
- [7] KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H.; HOFBAUER, H. (Hrsg.) (2016): Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren. 3., aktual. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 1867 Seiten, ISBN 978-3-662-47437-2
- [8] KUPTZ, D.; DIETZ, E.; SCHREIBER, K.; SCHÖN, C.; MACK, R.; WIESBECK, M.; BLUM, U.; BORCHERT, H.; HARTMANN, H. (2018): Holzhackschnitzel aus dem Kurzumtrieb. Brennstoffqualität und Verbrennungsverhalten. Berichte aus dem TFZ, Nr. 56. Straubing, Freising-Weihenstephan: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), 163 Seiten, ISSN 1614-1008
- [9] KUPTZ, D.; MENDEL, T.; MACK, R.; SCHÖN, C.; HARTMANN, H. (2017): Entwicklung eines Zertifizierungsprogramms für Holzhackschnitzel – Detaillierter Schlussbericht zu Teilvorhaben 2. Förderkennzeichen 22030314. In: DEUTSCHES PELLETINSTITUT GMBH (DEPI) (Hrsg.): Schlussbericht zum Vorhaben, Laufzeit: 01.02.2015 bis 31.10.2016, Monat der Erstellung: 03/2017. Berlin, Straubing: DEPI, TFZ, 137 Seiten, URL: <http://www.fnr-server.de/ftp/pdf/berichte/22030314.pdf> (Stand: Oktober 2019)

- [10] KUPTZ, D.; SCHREIBER, K.; SCHULMEYER, F.; LESCHE, S.; ZENG, T.; AHRENS, F.; ZELINSKI, V.; SCHÖN, C.; POLLEX, A.; BORCHERT, H.; LENZ, V.; LOEWEN, A.; NELLES, M.; HARTMANN, H. (2019): Evaluation of combined screening and drying steps for the improvement of the fuel quality of forest residue wood chips – results from six case studies. *Biomass Conversion and Biorefinery*, Jg. 9, Nr. 1, S. 83–98, URL: <https://doi.org/10.1007/s13399-019-00389-2> (Stand: Oktober 2019)
- [11] KUPTZ, D.; SCHULMEYER, F.; HÜTTL, K.; DIETZ, E.; TUROWSKI, P.; ZORMAIER, F.; BORCHERT, H.; HARTMANN, H. (2015): Optimale Bereitstellungsverfahren für Holzhackschnitzel. *Berichte aus dem TFZ*, Nr. 40. Straubing, Freising-Weihenstephan: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), 316 Seiten, ISSN 1614-1008
- [12] MÜLLER AG HOLZFEUERUNGEN (2010): Datenblatt Vor-/Rückschubfeuerung TMV 14 & 15 H. Balsthal, Schweiz
- [13] SCHÖN, C.; KUPTZ, D.; MACK, R.; ZELINSKI, V.; LOEWEN, A.; HARTMANN, H. (2019): Influence of wood chip quality on emission behaviour in small-scale wood chip boilers. *Biomass Conversion and Biorefinery*, Jg. 9, Nr. 1, S. 71–82

## Anhang

**Tabelle 5:** Übersicht der Hackschnitzellieferungen für das TFZ-Heizwerk mit Lieferdatum, Sortiment, Lieferant, Liefermenge im Anlieferungszustand (ar) und Bemerkungen zu den Hackschnitzeln (Erh – Energierundholz, Wrh – Waldrestholz, KUP – Kurzumtrieb, LPM – Landschaftspflegematerial)

| Lieferung | Datum      | Sortiment | Lieferant   | Menge<br>t (ar) | Bemerkung   |
|-----------|------------|-----------|-------------|-----------------|---|
| 1         | 01.10.2018 | Wrh       | Lieferant 1 | 10,10           | Fichtenhackschnitzel, gelagert,<br>z. T. Stämme mit Durchmesser unter 20 cm                           |
| 2         | 02.10.2018 | Wrh       | Lieferant 1 | 11,75           | wie Lieferung 1   |
| 3         | 16.10.2018 | KUP       | Lieferant 3 | 18,14           | Gemeinde Pilsting, zehn Jahre Umtrieb,<br>Pappel, geerntet im Dezember 2017,<br>vor Lieferung gehackt |
| 4         | 24.10.2018 | Wrh       | Lieferant 1 | 12,20           | wie Lieferung 1   |
| 5         | 30.10.2018 | Wrh       | Lieferant 1 | 12,03           | wie Lieferung 1   |
| 6         | 02.11.2018 | Wrh       | Lieferant 1 | 12,24           | wie Lieferung 1   |
| 7         | 06.11.2018 | Wrh       | Lieferant 1 | 12,22           | wie Lieferung 1   |
| 8         | 12.11.2018 | Wrh       | Lieferant 1 | 11,56           | wie Lieferung 1   |
| 9         | 15.11.2018 | Wrh       | Lieferant 1 | 12,09           | wie Lieferung 1   |
| 10        | 22.11.2018 | Wrh       | Lieferant 1 | 10,73           | wie Lieferung 1   |
| 11        | 23.11.2018 | Wrh       | Lieferant 1 | 10,82           | wie Lieferung 1   |
| 12        | 27.11.2018 | Wrh       | Lieferant 1 | 12,00           | wie Lieferung 1   |
| 13        | 29.11.2018 | Wrh       | Lieferant 1 | 12,24           | wie Lieferung 1   |
| 14        | 30.11.2018 | Wrh       | Lieferant 1 | 12,04           | wie Lieferung 1   |
| 15        | 06.12.2018 | Wrh       | Lieferant 1 | 24,90           | Engelsberg/Windberg, in Halle gelagert  |
| 16        | 12.12.2018 | Wrh       | Lieferant 1 | 10,38           | wie Lieferung 1   |
| 17        | 14.12.2018 | Erh       | Lieferant 2 | 21,89           |   |
| 18        | 07.01.2019 | Wrh       | Lieferant 2 | 23,07           |   |
| 19        | 08.01.2019 | Wrh       | Lieferant 2 | 23,03           |   |
| 20        | 14.01.2019 | Erh       | Lieferant 2 | 19,07           | Stammholz   |
| 21        | 22.01.2019 | Erh       | Lieferant 2 | 21,04           | reine Stammware   |
| 22        | 24.01.2019 | Erh       | Lieferant 2 | 18,56           | reine Stammware, Cham   |
| 23        | 17.01.2019 | Wrh       | Lieferant 2 | 25,32           | Gipfelmateriale, bereits am 17.01.2019 geliefert,<br>später eingefüllt in Bunker                      |
| 24        | 29.01.2019 | Wrh       | Lieferant 2 | 27,08           | Zinzenzell  |
| 25        | 05.02.2019 | Wrh       | Lieferant 2 | 26,06           | Zinzenzell  |
| 26        | 07.02.2019 | Wrh       | Lieferant 2 | 34,40           | Zinzenzell  |
| 27        | 11.02.2019 | KUP       | Lieferant 2 | 13,89           | Pappel  |
| 28        | 14.02.2019 | KUP       | Lieferant 2 | 20,07           | Pappel  |
| 29        | 14.02.2019 | LPM       | Lieferant 2 | 29,22           | ungesiebt   |
| 30        | 25.02.2019 | Erh       | Lieferant 2 | 20,38           | Stammholz   |
| 31        | 28.02.2019 | LPM       | Lieferant 2 | 23,70           | gleiches Material wie Lieferung 29, gesiebt   |
| 32        | 07.03.2019 | Wrh       | Lieferant 2 | 16,51           | Wiesenfelden  |
| 33        | 12.03.2019 | Wrh       | Lieferant 2 | 19,50           | Wiesenfelden  |
| 34        | 13.03.2019 | Wrh       | Lieferant 2 | 21,30           | Roding  |
| 35        | 20.03.2019 | Erh       | Lieferant 2 | 22,00           | Stammholz   |
| 36        | 21.03.2019 | Erh       | Lieferant 2 | 21,96           | Stammholz   |
| 37        | 27.03.2019 | Erh       | Lieferant 2 | 25,76           | Roding  |
| 38        | 02.04.2019 | Erh       | Lieferant 2 | 22,93           | Roding  |
| 39        | 05.04.2019 | Erh       | Lieferant 2 | 18,80           | Mitterfels  |

Tabelle 6: Bilder der Hackschnitzel aller Lieferungen ans TFZ (Erh – Energierundholz, Wrh – Waldrestholz, KUP – Kurzumtrieb, LPM – Landschaftspflegematerial)

Lieferung 01 – Wrh



Lieferung 02 – Wrh



Lieferung 03 – KUP



Lieferung 04 – Wrh



Lieferung 05 – Wrh



Lieferung 06 – Wrh



Lieferung 07 – Wrh



Lieferung 08 – Wrh



Lieferung 09 – Wrh



Lieferung 10 – Wrh



Lieferung 11 – Wrh



Lieferung 12 – Wrh



Lieferung 13 – Wrh



Lieferung 14 – Wrh



Lieferung 15 – Wrh



Lieferung 16 – Wrh



Lieferung 17 – Erh



Lieferung 18 – Wrh



Lieferung 19 – Wrh



Lieferung 20 – Erh



Lieferung 21 – Erh



Lieferung 22 – Erh



Lieferung 23 – Wrh



Lieferung 24 – Wrh



Lieferung 25 – Wrh



Lieferung 26 – Wrh



Lieferung 27 – KUP



Lieferung 28 – KUP



Lieferung 29 – LPM



Lieferung 30 – Erh



Lieferung 31 – LPM



Lieferung 32 – Wrh



Lieferung 33 – Wrh



Lieferung 34 – Wrh



Lieferung 35 – Erh



Lieferung 36 – Erh



Lieferung 37 – Erh



Lieferung 38 – Erh



Lieferung 39 – Erh



**Tabelle 7:** *Parameter zur Charakterisierung der Hackschnitzzellieferungen, wie Wassergehalt im Anlieferungszustand (ar), Aschegehalt, Heizwert, Schüttdichte (ohne Schrumpfung), jeweils wasserfrei (d) und Feingehalt*

| Lieferung  | Wassergehalt<br>m-% (ar) | Aschegehalt<br>m-% (d) | Heizwert<br>kJ/kg (d) | Schüttdichte<br>kg/m <sup>3</sup> (d) | Feingehalt<br>m-% |
|------------|--------------------------|------------------------|-----------------------|---------------------------------------|-------------------|
| 1          | 22,60 ± 0,26             | 0,85 ± 0,02            | 19.510 ± 16           | 163,57 ± 0,15                         | 9,15 ± 0,87       |
| 2          | 28,13 ± 0,31             | 1,17 ± 0,03            | 19.294 ± 33           | 177,96 ± 1,41                         | 3,18 ± 0,75       |
| 3          | 40,89 ± 0,86             | 2,19 ± 0,06            | 18.427 ± 64           | 187,10 ± 1,04                         | 5,71 ± 0,58       |
| 4          | 19,13 ± 0,19             | 1,84 ± 0,13            | 19.559 ± 40           | 207,59 ± 2,04                         | 13,56 ± 0,70      |
| 5          | 21,75 ± 0,27             | 1,99 ± 0,13            | 19.596 ± 17           | 201,52 ± 0,28                         | 17,92 ± 1,17      |
| 6          | 22,60 ± 0,33             | 1,46 ± 0,01            | 19.577 ± 7            | 193,52 ± 2,17                         | 10,76 ± 0,96      |
| 7          | 21,66 ± 0,30             | 1,36 ± 0,04            | 19.550 ± 32           | 194,90 ± 0,03                         | 16,21 ± 1,09      |
| 8          | 25,33 ± 0,57             | 1,52 ± 0,07            | 19.373 ± 22           | 186,34 ± 0,52                         | 11,52 ± 0,33      |
| 9          | 26,77 ± 0,70             | 1,10 ± 0,04            | 19.480 ± 4            | 169,67 ± 1,83                         | 7,28 ± 0,48       |
| 10         | 24,19 ± 0,18             | 1,34 ± 0,08            | 19.496 ± 8            | 172,37 ± 1,37                         | 12,27 ± 0,57      |
| 11         | 21,91 ± 0,30             | 0,76 ± 0,01            | 18.891 ± 50           | 167,10 ± 2,1                          | 7,41 ± 1,45       |
| 12         | 33,24 ± 0,75             | 1,50 ± 0,14            | 19.603 ± 11           | 169,28 ± 0,52                         | 6,91 ± 1,65       |
| 13         | 25,12 ± 0,43             | 1,78 ± 0,03            | 19.658 ± 7            | 184,64 ± 0,96                         | 7,27 ± 2,85       |
| 14         | 28,35 ± 0,73             | 1,77 ± 0,10            | 19.755 ± 18           | 183,02 ± 0,64                         | 10,57 ± 0,36      |
| 15         | 35,39 ± 0,76             | 2,99 ± 0,13            | 19.229 ± 8            | 163,93 ± 1,93                         | 17,78 ± 1,26      |
| 16         | 30,05 ± 0,60             | 1,25 ± 0,02            | 19.137 ± 2            | 164,93 ± 0,61                         | 11,46 ± 1,00      |
| 17         | 44,81 ± 1,10             | 0,16 ± 0,07            | 18.990 ± 2            | 172,05 ± 1,20                         | 2,67 ± 0,04       |
| 18         | 32,62 ± 0,95             | 3,27 ± 0,03            | 19.003 ± 20           | 200,81 ± 0,25                         | 19,94 ± 0,26      |
| 19         | 31,60 ± 0,27             | 4,43 ± 0,12            | 19.067 ± 67           | 201,85 ± 0,68                         | 14,32 ± 1,90      |
| 20         | 31,89 ± 0,68             | 1,45 ± 0,07            | 18.848 ± 20           | 182,71 ± 2,87                         | 9,81 ± 0,69       |
| 21         | 39,21 ± 0,52             | 0,64 ± 0,02            | 18.847 ± 1            | 167,23 ± 0,15                         | 3,98 ± 0,94       |
| 22         | 33,01 ± 1,07             | 0,79 ± 0,02            | 18.990 ± 1            | 165,86 ± 1,19                         | 3,00 ± 0,71       |
| 23         | 39,43 ± 1,42             | 4,15 ± 0,08            | 18.830 ± 35           | 200,66 ± 1,88                         | 21,57 ± 1,75      |
| 24         | 50,60 ± 0,60             | 2,88 ± 0,06            | 19.106 ± 22           | 195,70 ± 0,08                         | 15,39 ± 2,00      |
| 25         | 44,18 ± 0,58             | 2,75 ± 0,05            | 18.901 ± 23           | 184,86 ± 3,77                         | 16,28 ± 0,39      |
| 26         | 41,11 ± 0,40             | 5,81 ± 0,09            | 18.024 ± 62           | 188,76 ± 0,01                         | 15,45 ± 0,30      |
| 27         | 46,03 ± 1,21             | 1,96 ± 0,00            | 18.537 ± 8            | 142,12 ± 0,64                         | 6,71 ± 0,15       |
| 28         | 44,60 ± 1,01             | 2,05 ± 0,08            | 18.503 ± 36           | 148,92 ± 0,24                         | 6,83 ± 0,67       |
| 29         | 47,89 ± 0,85             | 4,41 ± 0,33            | 18.396 ± 38           | 201,40 ± 1,48                         | 10,62 ± 1,58      |
| 30         | 31,70 ± 0,12             | 0,60 ± 0,01            | 19.071 ± 25           | 155,68 ± 0,06                         | 3,44 ± 0,32       |
| 31         | 46,44 ± 0,32             | 1,40 ± 0,05            | 19.134 ± 26           | 191,14 ± 0,63                         | 7,97 ± 0,12       |
| 32         | 40,98 ± 0,37             | 1,74 ± 0,05            | 18.916 ± 11           | 181,26 ± 1,21                         | 13,39 ± 0,94      |
| 33         | 41,58 ± 0,79             | 2,04 ± 0,11            | 19.057 ± 8            | 186,99 ± 2,16                         | 9,44 ± 0,91       |
| 34         | 48,33 ± 0,99             | 1,26 ± 0,03            | 19.087 ± 53           | 166,94 ± 1,88                         | 5,24 ± 0,60       |
| 35         | 44,67 ± 1,16             | 0,23 ± 0,01            | 19.190 ± 11           | 152,17 ± 2,25                         | 2,58 ± 0,03       |
| 36         | 44,91 ± 1,49             | 0,22 ± 0,02            | 19.078 ± 12           | 152,54 ± 1,32                         | 1,21 ± 0,05       |
| 37         | 48,31 ± 1,70             | 0,32 ± 0,02            | 18.985 ± 21           | 152,93 ± 1,14                         | 2,19 ± 0,14       |
| 38         | 41,51 ± 1,85             | 0,48 ± 0,04            | 19.189 ± 3            | 169,20 ± 0,30                         | 0,96 ± 0,04       |
| 39         | 45,22 ± 1,01             | 0,59 ± 0,02            | 18.958 ± 32           | 176,41 ± 3,67                         | 4,09 ± 0,73       |
| Mittelwert | 35,6                     | 1,76                   | 19.099                | 177,58                                | 9,64              |

**Tabelle 8:** *Korngrößenverteilung der gelieferten Hackschnitzelsortimente, jeweils in Masseprozent im lufttrockenen Zustand*

| Lieferung | F 0–3,15 | F 3,15–8 | F 8–16 | F 16–31,5 | F 31,5–45 | F 45–63 | F > 63 |
|-----------|----------|----------|--------|-----------|-----------|---------|--------|
| 1         | 9,15     | 10,47    | 64,01  | 14,53     | 1,40      | 0,42    | 0,02   |
| 2         | 13,18    | 12,30    | 56,94  | 15,65     | 1,13      | 0,20    | 0,59   |
| 3         | 5,71     | 8,67     | 7,05   | 72,46     | 3,43      | 2,31    | 0,37   |
| 4         | 13,56    | 18,97    | 45,34  | 20,41     | 1,49      | 0,23    | 0,00   |
| 5         | 17,92    | 21,07    | 39,37  | 19,76     | 1,53      | 0,27    | 0,07   |
| 6         | 10,76    | 14,80    | 48,16  | 24,35     | 1,19      | 0,68    | 0,06   |
| 7         | 16,21    | 17,88    | 45,67  | 18,97     | 1,09      | 0,17    | 0,00   |
| 8         | 11,52    | 13,12    | 47,03  | 25,54     | 2,49      | 0,30    | 0,00   |
| 9         | 7,28     | 9,51     | 6,71   | 73,23     | 2,72      | 0,55    | 0,00   |
| 10        | 12,27    | 12,98    | 57,77  | 14,84     | 1,82      | 0,31    | 0,00   |
| 11        | 7,41     | 13,61    | 17,89  | 58,56     | 2,29      | 0,23    | 0,00   |
| 12        | 6,91     | 7,66     | 5,84   | 73,55     | 5,08      | 0,63    | 0,32   |
| 13        | 7,27     | 8,59     | 9,67   | 71,29     | 2,64      | 0,54    | 0,00   |
| 14        | 10,57    | 12,17    | 16,69  | 58,73     | 1,59      | 0,25    | 0,00   |
| 15        | 17,78    | 13,35    | 45,69  | 21,47     | 1,41      | 0,04    | 0,26   |
| 16        | 11,46    | 17,76    | 46,89  | 22,10     | 1,49      | 0,28    | 0,00   |
| 17        | 2,67     | 10,04    | 19,73  | 61,98     | 5,17      | 0,34    | 0,06   |
| 18        | 19,94    | 16,52    | 33,94  | 22,75     | 3,60      | 2,74    | 0,52   |
| 19        | 14,32    | 16,76    | 30,76  | 29,87     | 7,01      | 1,19    | 0,09   |
| 20        | 9,81     | 11,50    | 35,66  | 29,84     | 8,94      | 3,69    | 0,56   |
| 21        | 3,98     | 7,98     | 22,44  | 53,99     | 10,45     | 1,15    | 0,00   |
| 22        | 3,00     | 5,22     | 22,15  | 37,56     | 24,49     | 6,05    | 1,54   |
| 23        | 21,57    | 13,49    | 35,19  | 23,18     | 5,33      | 0,47    | 0,78   |
| 24        | 15,39    | 12,31    | 31,14  | 26,96     | 10,23     | 3,17    | 0,81   |
| 25        | 16,28    | 14,44    | 34,25  | 28,12     | 6,06      | 0,85    | 0,00   |
| 26        | 15,45    | 14,47    | 31,81  | 26,57     | 8,92      | 2,77    | 0,00   |
| 27        | 6,71     | 9,89     | 36,20  | 40,07     | 5,60      | 1,46    | 0,06   |
| 28        | 6,83     | 9,35     | 37,13  | 38,79     | 5,32      | 2,07    | 0,51   |
| 29        | 10,62    | 13,18    | 35,61  | 31,26     | 7,21      | 1,47    | 0,65   |
| 30        | 3,44     | 10,46    | 46,22  | 31,47     | 7,26      | 1,15    | 0,00   |
| 31        | 7,97     | 12,50    | 27,18  | 36,82     | 10,78     | 3,91    | 0,84   |
| 32        | 13,39    | 16,85    | 29,20  | 29,75     | 6,40      | 4,41    | 0,00   |
| 33        | 9,44     | 14,85    | 29,16  | 33,09     | 9,14      | 3,83    | 0,50   |
| 34        | 5,24     | 10,84    | 34,51  | 39,55     | 7,20      | 1,71    | 0,95   |
| 35        | 2,58     | 16,61    | 38,68  | 37,10     | 4,65      | 0,33    | 0,06   |
| 36        | 1,21     | 10,28    | 33,02  | 49,23     | 5,48      | 0,60    | 0,17   |
| 37        | 2,19     | 14,12    | 36,24  | 40,91     | 5,95      | 0,59    | 0,00   |
| 38        | 0,96     | 4,63     | 20,27  | 43,70     | 18,44     | 9,23    | 2,77   |
| 39        | 4,09     | 7,71     | 28,40  | 44,25     | 11,38     | 3,88    | 0,29   |



**Tabelle 9:** *Hauptelemente der gelieferten Hackschnitzelsortimente für das TFZ-Heizwerk, jeweils bezogen auf die Trockenmasse (n. b. – nicht bestimmt)*

| Lieferung  | C<br>m-% | H<br>m-% | N<br>m-% | S<br>m-% | Cl<br>m-% | Al<br>mg/kg | Ca<br>mg/kg |
|------------|----------|----------|----------|----------|-----------|-------------|-------------|
| 1          | 51,0     | 6,1      | 0,16     | n. b.    | n. b.     | 178         | 1.590       |
| 2          | 50,4     | 6,1      | 0,25     | n. b.    | n. b.     | 357         | 2.140       |
| 3          | 49,7     | 6,0      | 0,15     | 0,012    | < 0,005   | 277         | 5.190       |
| 4          | 51,4     | 6,0      | 0,24     | n. b.    | n. b.     | 258         | 2.510       |
| 5          | 51,4     | 6,1      | 0,32     | n. b.    | n. b.     | 586         | 3.010       |
| 6          | 51,7     | 6,1      | 0,16     | 0,009    | 0,007     | 258         | 2.390       |
| 7          | 52,0     | 6,0      | 0,16     | 0,011    | 0,008     | 182         | 2.290       |
| 8          | 51,3     | 6,1      | 0,23     | n. b.    | n. b.     | 284         | 2.240       |
| 9          | 51,5     | 6,1      | 0,15     | 0,015    | 0,007     | 188         | 2.050       |
| 10         | 51,2     | 6,1      | 0,21     | n. b.    | n. b.     | 332         | 1.940       |
| 11         | 50,9     | 6,1      | 0,15     | n. b.    | n. b.     | 80          | 1.390       |
| 12         | 51,5     | 6,0      | 0,27     | n. b.    | n. b.     | 840         | 2.290       |
| 13         | 51,6     | 6,0      | 0,15     | n. b.    | n. b.     | 634         | 2.940       |
| 14         | 51,0     | 6,0      | 0,21     | n. b.    | n. b.     | 645         | 2.560       |
| 15         | 51,2     | 6,0      | 0,30     | 0,024    | 0,014     | 1.370       | 2.790       |
| 16         | 51,3     | 6,1      | 0,17     | 0,015    | 0,006     | 431         | 2.100       |
| 17         | 50,6     | 6,2      | 0,09     | n. b.    | n. b.     | 24          | 717         |
| 18         | 50,7     | 6,0      | 0,37     | n. b.    | n. b.     | 1.550       | 4.260       |
| 19         | 50,1     | 6,0      | 0,32     | 0,049    | 0,011     | 1.660       | 4.130       |
| 20         | 50,5     | 6,2      | 0,23     | 0,013    | 0,010     | 310         | 2.510       |
| 21         | 50,8     | 6,2      | 0,08     | 0,032    | < 0,005   | 30          | 1.430       |
| 22         | 51,0     | 6,2      | 0,05     | n. b.    | n. b.     | 25          | 1.680       |
| 23         | 50,0     | 6,0      | 0,44     | 0,026    | 0,019     | 1.640       | 5.390       |
| 24         | 51,0     | 6,0      | 0,31     | n. b.    | n. b.     | 999         | 3.380       |
| 25         | 50,4     | 6,0      | 0,40     | 0,030    | 0,017     | 963         | 4.890       |
| 26         | 48,5     | 5,9      | 0,43     | 0,021    | 0,011     | 1.850       | 4.890       |
| 27         | 49,9     | 6,2      | 0,36     | 0,025    | 0,006     | 216         | 3.800       |
| 28         | 49,5     | 6,1      | 0,40     | 0,033    | 0,007     | 241         | 3.690       |
| 29         | 49,4     | 6,1      | 0,31     | 0,020    | 0,019     | 1.410       | 5.290       |
| 30         | 50,9     | 6,1      | 0,07     | n. b.    | n. b.     | 30          | 1.110       |
| 31         | 50,7     | 6,3      | 0,32     | 0,025    | 0,009     | 220         | 3.000       |
| 32         | 50,9     | 6,2      | 0,30     | n. b.    | n. b.     | 429         | 3.890       |
| 33         | 51,0     | 6,1      | 0,26     | n. b.    | n. b.     | 505         | 4.130       |
| 34         | 51,1     | 6,2      | 0,25     | n. b.    | n. b.     | 281         | 3.090       |
| 35         | 50,9     | 6,3      | 0,07     | n. b.    | n. b.     | 21          | 546         |
| 36         | 51,0     | 6,4      | 0,06     | n. b.    | n. b.     | 6,4         | 577         |
| 37         | 50,5     | 6,3      | 0,08     | 0,023    | < 0,005   | 34          | 773         |
| 38         | 51,3     | 6,2      | 0,12     | n. b.    | n. b.     | 49          | 1.420       |
| 39         | 51,0     | 6,1      | 0,13     | n. b.    | n. b.     | 70          | 1.610       |
| Mittelwert | 50,8     | 6,1      | 0,23     | 0,023    | 0,011     | 499         | 2.708       |

*Tabelle 10: Weitere Hauptelemente der Hackschnitzelsortimente für das TFZ-Heizwerk, jeweils bezogen auf die Trockenmasse*

| Lieferung  | Fe<br>mg/kg | K<br>mg/kg | Mg<br>mg/kg | Na<br>mg/kg | P<br>mg/kg | Si<br>mg/kg | K + Na<br>mg/kg |
|------------|-------------|------------|-------------|-------------|------------|-------------|-----------------|
| 1          | 96          | 1.130      | 313         | 59          | 102        | 748         | 1.189           |
| 2          | 179         | 1.260      | 403         | 840         | 158        | 1.740       | 2.100           |
| 3          | 173         | 2.700      | 457         | 34          | 422        | 1.760       | 2.734           |
| 4          | 121         | 1.400      | 454         | 59          | 218        | 2.900       | 1.459           |
| 5          | 187         | 1.700      | 526         | 173         | 287        | 3.320       | 1.873           |
| 6          | 107         | 1.450      | 455         | 50          | 201        | 1.190       | 1.500           |
| 7          | 89          | 1.420      | 417         | 29          | 180        | 964         | 1.449           |
| 8          | 114         | 1.400      | 394         | 46          | 160        | 1.400       | 1.446           |
| 9          | 76          | 1.560      | 351         | 46          | 145        | 810         | 1.606           |
| 10         | 139         | 1.130      | 353         | 81          | 153        | 966         | 1.211           |
| 11         | 43          | 878        | 270         | 15          | 78         | 309         | 893             |
| 12         | 382         | 1.460      | 521         | 197         | 200        | 4.190       | 1.657           |
| 13         | 278         | 1.500      | 464         | 129         | 166        | 2.390       | 1.629           |
| 14         | 303         | 1.440      | 489         | 178         | 166        | 2.730       | 1.618           |
| 15         | 621         | 2.190      | 635         | 248         | 279        | 5.830       | 2.438           |
| 16         | 206         | 1.460      | 410         | 75          | 163        | 1.710       | 1.535           |
| 17         | 17          | 501        | 132         | <10         | 52         | 114         | 501             |
| 18         | 765         | 2.380      | 607         | 248         | 332        | 7.600       | 2.628           |
| 19         | 483         | 2.570      | 544         | 423         | 328        | 8.630       | 2.993           |
| 20         | 143         | 1.230      | 296         | 89          | 165        | 1.400       | 1.319           |
| 21         | 17          | 1.330      | 208         | <10         | 38         | 219         | 1.330           |
| 22         | 17          | 1.430      | 236         | <10         | 31         | <100        | 1.430           |
| 23         | 892         | 2.570      | 822         | 329         | 398        | 9.650       | 2.899           |
| 24         | 435         | 1.800      | 507         | 167         | 272        | 4.700       | 1.967           |
| 25         | 424         | 2.160      | 581         | 188         | 452        | 4.150       | 2.348           |
| 26         | 858         | 3.100      | 599         | 290         | 538        | 10.500      | 3.390           |
| 27         | 126         | 2.850      | 490         | 35          | 645        | 1.720       | 2.885           |
| 28         | 148         | 2.560      | 458         | 35          | 634        | 2.060       | 2.595           |
| 29         | 978         | 2.350      | 514         | 369         | 371        | 7.300       | 2.719           |
| 30         | 18          | 1.330      | 200         | <10         | 39         | <100        | 1.330           |
| 31         | 127         | 1.460      | 374         | 46          | 302        | 1.360       | 1.506           |
| 32         | 149         | 1.600      | 377         | 105         | 285        | 1.910       | 1.705           |
| 33         | 218         | 1.690      | 412         | 99          | 274        | 1.990       | 1.789           |
| 34         | 138         | 1.330      | 351         | 80          | 248        | 1.330       | 1.410           |
| 35         | 23          | 408        | 132         | 14          | 37         | <100        | 422             |
| 36         | 16          | 388        | 127         | 14          | 37         | <100        | 402             |
| 37         | 36          | 421        | 137         | <10         | 45         | 243         | 421             |
| 38         | 17          | 714        | 212         | <10         | 73         | 162         | 714             |
| 39         | 36          | 489        | 233         | <10         | 77         | 346         | 849             |
| Mittelwert | 236         | 1.567      | 396         | 150         | 224        | 2.810       | 1.689           |

## Berichte aus dem TFZ

Bisher erschienene Ausgaben der Schriftenreihe des Technologie- und Förderzentrums:

|    |  |
|----|--|
| 1  | Qualitätssicherung bei der dezentralen Pflanzenölerzeugung für den Nicht-Nahrungsbereich<br>Projektphase 1: Erhebung der Ölqualität und Umfrage in der Praxis              |
| 2  | Erprobung der Brennwerttechnik bei häuslichen Holzhackschnitzelheizungen mit Sekundärwärmetauscher   |
| 3  | Daten und Fakten zur dezentralen Ölgewinnung in Deutschland  |
| 4  | Untersuchungen zum Feinstaubausstoß von Holzcentralheizungsanlagen kleiner Leistung  |
| 5  | Qualität von kaltgepresstem Rapsöl als Speiseöl und Festlegung eines Qualitätsstandards  |
| 6  | Entwicklung einer Prüfmethode zur Bestimmung der Cetanzahl von Rapsölkraftstoff  |
| 7  | Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Rapsöl als Kraftstoff und dem Motorenöl in pflanzenöлтаuglichen Motoren   |
| 8  | Wärmegegewinnung aus Biomasse – Begleitmaterialien zur Informationsveranstaltung   |
| 9  | Maize as Energy Crop for Combustion – Agricultural Optimisation of Fuel Supply   |
| 10 | Staubemissionen aus Holzfeuerungen – Einflussfaktoren und Bestimmungsmethoden  |
| 11 | Rationelle Scheitholzbereitstellungsverfahren  |
| 12 | Qualitätssicherung bei der dezentralen Pflanzenölerzeugung für den Nicht-Nahrungsbereich<br>Technologische Untersuchungen und Erarbeitung von Qualitätssicherungsmaßnahmen |
| 13 | Getreidekörner als Brennstoff für Kleinfeuerungen – Technische Möglichkeiten und Umwelteffekte   |
| 14 | Mutagenität der Partikelemissionen eines mit Rapsöl- und Dieselmkraftstoff betriebenen Traktors  |
| 15 | Befragung von Betreibern dezentraler Ölsaatenverarbeitungsanlagen  |
| 16 | Schnellbestimmung des Wassergehaltes im Holzsplit  |
| 17 | Untersuchungen zum Einsatz rapsölbetriebener Traktoren beim Lehr-, Versuchs- und Fachzentrum für Ökologischen Landbau und Tierhaltung Kringell                             |

|    |   |
|----|---|
| 18 | Miscanthus als Nachwachsender Rohstoff – Ergebnisse aus bayerischen Forschungsarbeiten  |
| 19 | Miscanthus: Anbau und Nutzung – Informationen für die Praxis  |
| 20 | Prüfung der Eignung von Verfahren zur Reduktion ablagerungs- und aschebildender Elemente in Rapsölkraftstoff bei der dezentralen Erzeugung                  |
| 21 | Kleine Biomassefeuerungen – Markt Betrachtungen, Betriebsdaten, Kosten und Wirtschaftlichkeit   |
| 22 | Partikelemissionen aus Kleinfeuerungen für Holz und Ansätze für Minderungsmaßnahmen   |
| 23 | Bewertung kostengünstiger Staubabscheider für Einzelfeuerstätten und Zentralheizungskessel  |
| 24 | Charakterisierung von Holzbriketts  |
| 25 | Additivierung von Rapsölkraftstoff – Auswahl der Additive und Überprüfung der Wirksamkeit   |
| 26 | Status quo der dezentralen Ölgewinnung – bundesweite Befragung  |
| 27 | Entwicklung einer Siloabdeckung aus Nachwachsenden Rohstoffen   |
| 28 | Sorghumhirse als Nachwachsender Rohstoff – Sortenscreening und Anbauszenarien   |
| 29 | Sorghum als Energiepflanze – Optimierung der Produktionstechnik   |
| 30 | Ethanol aus Zuckerhirse – Gesamtkonzept zur nachhaltigen Nutzung von Zuckerhirse als Rohstoff für die Ethanolherstellung                                    |
| 31 | Langzeiterfahrungen zum Einsatz von Rapsölkraftstoff in Traktoren der Abgasstufe I und II   |
| 32 | Pflanzenöлтаugliche Traktoren der Abgasstufe IIIA – Prüfstandsuntersuchungen und Feldeinsatz auf Betrieben der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft |
| 33 | Betriebs- und Emissionsverhalten eines pflanzenöлтаuglichen Traktors mit Rapsöl, Sojaöl und Sonnenblumenöl  |
| 34 | Dezentrale Ölsaatenverarbeitung 2012/2013 – eine bundesweite Befragung  |
| 35 | Additivierung von Rapsölkraftstoff – Projektphase 2: Langzeit- und Prüfstandsuntersuchungen   |
| 36 | Nutzer- und Brennstoffeinflüsse auf Feinstaubemissionen aus Kleinfeuerungsanlagen   |
| 37 | Screening und Selektion von Amarantsorten und -linien als spurenelementreiches Biogassubstrat   |

|    |  |
|----|--|
| 38 | Untersuchung der Praxistauglichkeit eines Elektrofilters für Kleinf Feuerungsanlagen   |
| 39 | Eignung von Buchweizen und Quinoa als späte Zweitfrüchte für die Biogasnutzung   |
| 40 | Optimale Bereitstellungsverfahren für Holzhackschnitzel  |
| 41 | Qualitätssicherung bei der dezentralen Herstellung von Rapsölkraftstoff nach DIN 51605   |
| 42 | Weiterentwicklung einer Siloabdeckung auf Basis Nachwachsender Rohstoffe   |
| 43 | Brennstoffqualität von Holzpellets   |
| 44 | Herstellung und Demonstration der Praxistauglichkeit von Traktoren mit Motoren der Abgasstufe IV im Betrieb mit Pflanzenöl       |
| 45 | ExpRessBio – Methoden  |
| 46 | Qualität von Holzhackschnitzeln in Bayern  |
| 47 | Pflanzenöлтаugliche Traktoren der Abgasstufen I bis IIIB   |
| 48 | Sorghum als Biogassubstrat – Präzisierung der Anbauempfehlungen für baye-rische Anbaubedingungen                                 |
| 49 | Zünd- und Verbrennungsverhalten alternativer Kraftstoffe   |
| 50 | Rapsölkraftstoffproduktion in Bayern – Analyse und Bewertung ökologischer und ökonomischer Wirkungen nach der ExpRessBio-Methode |
| 51 | Emissions- und Betriebsverhalten eines Biomethantraktors mit Zündstrahlmotor   |
| 52 | Schnellbestimmung des Wassergehalts von Holzhackschnitzeln   |
| 53 | Bioenergieträger mit Blühaspekt: Leguminosen-Getreide-Gemenge  |
| 54 | Dauerkulturen – Aufzeigen der bayernweiten Anbaueignung  |
| 55 | Lagerung von Holzhackschnitzeln  |
| 56 | Holzhackschnitzel aus dem Kurzumtrieb  |
| 57 | Optimierungspotentiale bei Kaminöfen – Emissionen, Wirkungsgrad und Wärmeverluste  |
| 58 | Überführung einer Siloabdeckung auf Basis Nachwachsender Rohstoffe in die Praxisreife  |
| 59 | Regionalspezifische Treibhausgasemissionen der Raps erzeugung in Bayern  |
| 60 | Langzeitmonitoring pflanzenöлтаuglicher Traktoren der Abgasstufen I bis IV   |
| 61 | Nutzereinflüsse auf die Emissionen aus Kaminöfen   |

|    |   |
|----|---|
| 62 | Abgasverhalten von Fahrzeugen im realen Betrieb mit alternativen Kraftstoffen – Bestimmung mit einem portablen Emissionsmesssystem (PEMS) |
| 63 | Rapsölkraftstoff als Energieträger für den Betrieb eines forstwirtschaftlichen Vollernters (Harvester)                                    |
| 64 | Amarant als Biogassubstrat – Selektion zur Erarbeitung praxistauglicher Amarantlinien für bayerische Standorte                            |
| 65 | Schwierige Pelletbrennstoffe für Kleinfeuerungsanlagen – Verbrennungstechnische Optimierung durch Additivierung und Mischung              |
| 66 | Einflussfaktoren auf die NO <sub>x</sub> -Emissionen in Hackschnitzelheizwerken zwischen 1 und 5 Megawatt                                 |





ISSN 1614-1008