



## Berichte aus dem TFZ

# Charakterisierung von Holzbriketts

Brennstofftechnische,  
physikalische und  
stoffliche Eigenschaften –  
eine Marktstichprobe





# Charakterisierung von Holzbriketts





# **Charakterisierung von Holzbriketts**

**Brennstofftechnische, physikalische und stoffliche  
Eigenschaften – eine Marktstichprobe**

Claudia Schön

Dr. Hans Hartmann

**Berichte aus dem TFZ 24**

Straubing, April 2011

Titel: Charakterisierung von Holzbriketts  
Brennstofftechnische, physikalische und stoffliche Eigenschaften – eine  
Marktstichprobe  
Autoren: Claudia Schön, Dr. Hans Hartmann  
weitere Mitarbeiter: Klaus Reisinger, Sonja Plankl

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Eigenmitteln sowie mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

© 2011  
Technologie- und Förderzentrum (TFZ)  
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, Straubing

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

ISSN: 1614-1008

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

Redaktion: Claudia Schön, Dr. Hans Hartmann  
Verlag: Eigenverlag, Technologie- und Förderzentrum (TFZ)  
Erscheinungsort: Straubing  
Erscheinungsjahr: 2011  
Gestaltung: Claudia Schön  
Fotonachweis: Claudia Schön

## **Inhaltsverzeichnis**

	Inhaltsverzeichnis.....	5
	Abbildungsverzeichnis .....	7
	Tabellenverzeichnis.....	9
1	Einleitung und Zielsetzung.....	11
2	Auswahl der Holzbriketts .....	13
3	Richtlinien zur Charakterisierung von Holzbriketts.....	15
4	Brennstofftechnische Eigenschaften und deren Bestimmung ...	17
4.1	Aschegehalt .....	17
4.2	Wassergehalt .....	18
4.3	Heizwert.....	20
5	Physikalische Eigenschaften und deren Bestimmung.....	23
5.1	Teilchendichte.....	23
5.2	Abriebfestigkeit.....	26
6	Stoffliche Zusammensetzung der Holzbriketts .....	29
6.1	Hauptelemente .....	29
6.2	Spurenelemente und Schwermetalle.....	34
7	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen .....	39
8	Quellenverzeichnis.....	41
9	Anhang .....	43



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Untersuchte Holzbriketts. Alle Bilder wurden aus der gleichen Perspektive aufgenommen, so dass die tatsächlichen Größenverhältnisse korrekt wiedergegeben sind. Nummer 32 und 35 sind reine Rindenbriketts.....	14
Abbildung 2:	Aschegehalt der Holzbriketts, bezogen auf die Trockenmasse, mit Grenzwerten der jeweiligen Anforderungsnormen .....	18
Abbildung 3:	Wassergehalt der Holzbriketts, bezogen auf die Frischmasse, mit Grenzwerten der jeweiligen Anforderungsnormen .....	19
Abbildung 4:	Heizwert der Holzbriketts, bezogen auf die Trockenmasse, keine Normanforderung eingezeichnet, da unterschiedliche Bezugsgrößen verwendet werden.....	20
Abbildung 5:	Abhängigkeit des Heizwertes vom Aschegehalt, jeweils bezogen auf die Trockenmasse.....	21
Abbildung 6:	Teilchendichte der Holzbriketts, Auftriebsmessung bzw. stereometrische Bestimmung, mit Grenzwerten der jeweiligen Anforderungsnormen .....	24
Abbildung 7:	Teilchendichte der Holzbriketts in Abhängigkeit von der Brikettform sowie Bandbreite und Mittelwert der Messwerte. n ist die Anzahl der Brikettproben je Form.....	25
Abbildung 8:	Variationskoeffizienten der Teilchendichtebestimmung.....	26
Abbildung 9:	Abriebfestigkeit der untersuchten Holzbriketts (keine Normanforderungen vorhanden) .....	27
Abbildung 10:	Abriebfestigkeit nach Brikettform mit dem Minimum, Mittelwert und Maximum sortiert. n ist die Anzahl der Brikettproben je Form. ....	28
Abbildung 11:	Hauptkomponenten C, H und O der Holzbriketts, bezogen auf die Trockenmasse (keine Normanforderungen vorhanden) .....	30
Abbildung 12:	Ca-, K- und Mg-Gehalt, bezogen auf die Trockenmasse (keine Normanforderungen vorhanden) .....	31
Abbildung 13:	Stickstoffgehalt der Holzbriketts, bezogen auf die Trockenmasse, mit Grenzwerten der jeweiligen Anforderungsnormen.....	32
Abbildung 14:	Schwefelgehalt der Holzbriketts, bezogen auf die Trockenmasse, mit Grenzwerten der jeweiligen Anforderungsnormen.....	33
Abbildung 15:	Chlorgehalt der Holzbriketts, bezogen auf die Trockenmasse, mit Grenzwerten der jeweiligen Anforderungsnormen .....	34
Abbildung 16:	Gehalt an Cu, Ni und Cr der Holzbriketts, bezogen auf die Trockenmasse, mit Grenzwerten der jeweiligen Anforderungsnormen (einheitlicher Grenzwert in FprEN 14 961-3, A1/A2).....	35

Abbildung 17: Na- und Zn-Gehalt der Holzbriketts, bezogen auf die Trockenmasse,  
mit Zn-Grenzwert der jeweiligen Anforderungsnorm..... 36

Abbildung 18: Si-Gehalt der Holzbriketts, bezogen auf die Trockenmasse ..... 38

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Vergleich der Normen für Holzbriketts, $H_u$ Heizwert, wf wasserfrei, waf wasser- und aschefrei, ar im Anlieferungszustand („as received“), k. A. keine Angaben, Masse-% Masseprozent, alle stofflichen Komponenten auf Trockenmasse bezogen .....16
Tabelle 2:	Einzelwerte des Holzbrikettscreenings – Aschegehalt, Wassergehalt, Heizwert, Abriebfestigkeit und Dichte aus Auftriebsmessung (Dichte 1) und stereometrischer Bestimmung (Dichte 2) .....43
Tabelle 3:	Einzelwerte des Holzbrikettscreenings – Gehalt an H, C, N, O, S und Cl sowie Ca, Mg, K und Si, jeweils bezogen auf die Trockenmasse.....44
Tabelle 4:	Einzelwerte des Holzbrikettscreenings – Schwermetallgehalte: Na, As, Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Hg und Zn, jeweils bezogen auf die Trockenmasse.....45



## 1 Einleitung und Zielsetzung

Holzbriketts werden hauptsächlich in Holzöfen eingesetzt und ersetzen dort vor allem Scheitholz. Ihre einfache Handhabung, die Vorteile bei der Lagerung und die längere Brenndauer haben ihren Bekanntheitsgrad gesteigert. Sie können mittlerweile fast überall erworben werden, im Holzfachhandel, in Baumärkten, in Supermärkten oder an Tankstellen. Ihr Verbrauch in Deutschland wird für das Jahr 2009 auf ca. 350.000 Tonnen geschätzt [9].

Holzbriketts werden aus unterschiedlichen Rohstoffen (meist Späne) durch Pressen auch in kleineren Betrieben hergestellt. Hierbei werden die Rohstoffe etwa auf ein Viertel ihres Ausgangsvolumens verdichtet [17]. Wegen der unterschiedlichen Pressverfahren und Presslingsformen aber auch wegen der verschiedenen Rohstoffe ist die Qualität der Holzbriketts uneinheitlich. Es treten Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung und bei den physikalischen Eigenschaften auf, was sich wiederum auch auf das Brennverhalten auswirkt.

Mit dem hier durchgeführten „Holzbrikettscreening“ soll eine Übersicht über die Qualitätsschwankungen und Eigenschaften der am deutschen Markt verfügbaren Holzbriketts gegeben werden. Dadurch wird eine brennstofftechnische und umweltbezogene Beurteilung der für die Brikettierung verwendeten Rohstoffe ermöglicht. Letztlich sollen aber auch ungeeignete Brennstoffqualitäten identifiziert werden, wobei sich in diesem Zusammenhang auch die Frage nach der Einhaltung heutiger und zukünftiger Mindeststandards stellt. Besondere Aktualität ergibt sich dabei durch die derzeit laufenden internationalen Normungsarbeiten innerhalb des CEN TC 335 bzw. ISO TC 238. Hier werden derzeit neue Qualitätsanforderungen und -klassen diskutiert, deren Auswirkungen auf den deutschen Markt anhand der hier vorliegenden Reihenuntersuchung sichtbar werden.

Zunächst werden in diesem Bericht die ausgewählten Holzbriketts kurz vorgestellt. Anschließend werden die für die Charakterisierung zugrunde liegenden Vorschriften und Normen vorgestellt. Auf dieser Grundlage werden die brennstofftechnischen, physikalischen und chemischen Kennwerte für alle Holzbrikettproben bestimmt und vergleichend bewertet. Nach der vergleichenden Betrachtung werden die Ergebnisse ausgewertet und im Hinblick auf notwendige Qualitätsverbesserungen diskutiert.



## 2 Auswahl der Holzbriketts

Für das Holzbrikettscreening wurden 36 Holzbrikettproben zu je ca. 20 kg auf dem Markt beschafft. Bei der Beschaffung wurden sehr unterschiedliche Bezugsquellen wie Baumärkte, Brennstoffhändler, Tankstellen oder die Holzindustrie gewählt. Auch Holzbriketts von überregionalen Händlern über Internetbestellungen wurden in die Beprobung integriert. Bei allen – bis auf eine Brikettprobe – handelte es sich um in Schrumpffolie verpackte Ware, wodurch diese vor Feuchtigkeit geschützt war. In der Regel befanden sich pro Packung 10 kg Holzbriketts mit einer unterschiedlichen Anzahl an Briketts. In 13 der Proben war eine Informationsbeilage enthalten mit Brennstoffkenndaten wie zum Beispiel Heizwert, Asche- oder Wassergehalt. In den Beilagen fanden sich jedoch keine Informationen über das verwendete Ausgangsmaterial oder sonstigen Eigenschaften. Bei den restlichen 23 Holzbriketts gab es keinerlei Kennzeichnungen. In einigen Fällen konnte das Ausgangsmaterial durch Nachfrage ermittelt werden. Der Hersteller war in der Regel unbekannt, somit kann lediglich die Vertriebsadresse genannt werden. Bei zwei der untersuchten Holzbriketts handelt es sich um reine Rindenbriketts, die auch als Gluthalter bezeichnet werden. Zu Vergleichszwecken wurde im Rahmen dieser Studie auch ein Braunkohlenbrikett ausgewählt und analysiert.

Einen Überblick über die untersuchten Holzbriketts gibt Abbildung 1. Darauf ist erkennbar, dass sich die Holzbriketts schon optisch in Form und Farbe deutlich unterscheiden. Für die Vergleiche wurden die Proben fortlaufend nummeriert, so dass jeder Brennstoffprobe die entsprechende Kennziffer zugeordnet ist. Die Holzbrikettproben Nr. 32 und 35 sind reine Rindenbriketts und unterscheiden sich farblich voneinander kaum, sie sind jedoch in ihrer Form verschieden.

Bei den hier untersuchten Holzbriketts dominiert mit 14 Stück die quaderähnliche Form, auch bekannt unter der Bezeichnung „Ruf-Form“ (Brikettpressprinzip des Herstellers Ruf). Weiterhin stark vertreten sind die runden Briketts mit und ohne Zugloch (6 bzw. 7 Proben). Auch vier-, sechs-, und achtkantige Briketts mit Loch wurden untersucht; deren Oberfläche ist vermutlich aufgrund von beginnenden Pyrolyseprozessen infolge der hohen Reibungshitze etwas dunkler, zudem handelt es sich hierbei fast durchweg um Hartholz. Bei der Verdichtung wird das im äußeren Holz enthaltene Lignin durch Reibung bis zum Schmelzpunkt erhitzt, was zu einem Verkleben der Holzfasern direkt an den Reibungsflächen führt.



Abbildung 1: Untersuchte Holzbriketts. Alle Bilder wurden aus der gleichen Perspektive aufgenommen, so dass die tatsächlichen Größenverhältnisse korrekt wiedergegeben sind. Nummer 32 und 35 sind reine Rindenbriketts.

### 3 Richtlinien zur Charakterisierung von Holzbriketts

Für die Untersuchungen von Holzbriketts lassen sich deutsche und europäische Anforderungs- bzw. Prüfnormen heranziehen. Als Anforderungsnormen sind vor allem die DIN 51 731 („Prüfung fester Brennstoffe – Presslinge aus naturbelassenem Holz“) [10] und der Schluss-Entwurf der FprEN 14 961-3 („Solid biofuels – Fuel specifications and classes — Part 3: Wood briquettes for non-industrial use“) mit Stand vom Juni 2010 für die Charakterisierung von Holzbriketts auf europäischer Ebene [7] zu nennen. In der deutschen Norm erfolgt bezüglich der Grenzwerte keine Unterscheidung in Holz- bzw. Rindenbriketts. Bei der zukünftigen europäischen Norm sind die Anforderungen an Holzbriketts (Klasse A1) und Holzbriketts mit Rinde (Klasse A2) verschieden. Zu Vergleichszwecken ist hier auch die österreichische Norm, der ÖNORM M 7135 („Presslinge aus naturbelassenem Holz oder naturbelassener Rinde: Pellets und Briketts - Anforderungen und Prüfbestimmungen“) [21] zu nennen. Bei den Prüfverfahren sind die einschlägigen Normen für die Bestimmung der einzelnen Messgrößen zu nennen (Aschegehalt [13], Wassergehalt [12], Heizwert [11], Teilchendichte [3], Abriebfestigkeit [4], Gehalt an Gesamtkohlenstoff, Wasserstoff und Stickstoff [2], Gesamtgehalt an Schwefel [5], Hauptelemente (Al, Ca, Fe, Mg, P, K, Si, Na, Ti, Ba, Mn) [6] und Spurenelemente [14]). Gemäß Informationsbeilage erfüllen die Briketts mit den Nummern 9 und 16 nur die Anforderungen der DIN 51 731; die Nummern 3, 5 und 8 wird zusätzlich auch die Übereinstimmung mit der ÖNORM M 7135 erklärt, und Brikettnummer 2 erfüllt zusätzlich noch die DIN<sub>plus</sub>-Anforderungen.

Zur Charakterisierung der Brennstoffeigenschaften gehören brennstofftechnische, physikalische und chemische Eigenschaften. Zu den brennstofftechnischen Eigenschaften zählen der Wasser- und Aschegehalt sowie der Heizwert. Die physikalischen Eigenschaften schließen die Abriebfestigkeit und Teilchendichte ein. Weiterhin sind die Haupt- und Spurenelemente von Interesse, da diese z.T. die Verbrennungseigenschaften beeinflussen. Die Grenzwerte der verschiedenen Parameter der jeweiligen Norm sind Tabelle 1 zu entnehmen, wobei hier zum Vergleich auch die Grenzwerte der österreichischen Norm aufgeführt sind. Bei den Bewertungen der Briketteigenschaften erfolgt aber lediglich eine Orientierung an der deutschen Anforderungsnorm bzw. am europäischen Normenentwurf. Hierbei beziehen sich die stofflichen Komponenten immer auf die Trockenmasse; nur der Wassergehalt bezieht sich auf den feuchten Brennstoff.

*Tabelle 1: Vergleich der Normen für Holzbriketts, wf wasserfrei, waf wasser- und aschefrei, ar im Anlieferungszustand („as received“), k. A. keine Angaben, Masse-% Masseprozent, alle stofflichen Komponenten auf Trockenmasse bezogen*

Kennwert	DIN 51 731	ÖNORM M 7135		FprEN 14 961-3 Stand Juni 2010	
		Holz/Rinde	Holz (HP3)	Rinde (RP3)	Holz (A1)
Wassergehalt [Masse-%]	< 12	< 10	< 18	< 15	< 15
Aschegehalt [Masse-%]	< 1,5	< 0,5	< 6,0	< 0,7	< 1,5
Heizwert [MJ/kg]	17,5 - 19,5 (waf)	> 18 (wf)	> 18 (wf)	> 16,5 (ar)	> 16,3 (ar)
Teilchendichte [kg/dm <sup>3</sup> ]	1,0-1,4	> 1,0	> 1,1	> 1,0	> 1,0
Abriebfestigkeit [%]	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
S [Masse-%]	< 0,08	< 0,04	< 0,08	< 0,05	< 0,05
Cl [Masse-%]	< 0,03	< 0,02	< 0,04	< 0,02	< 0,02
N [Masse-%]	< 0,30	< 0,30	< 0,60	< 0,30	< 0,50
As [mg/kg]	< 0,8	k. A.	k. A.	< 1,0	< 1,0
Cd [mg/kg]	< 0,5	k. A.	k. A.	< 0,5	< 0,5
Cr [mg/kg]	< 8	k. A.	k. A.	< 10	< 10
Cu [mg/kg]	< 5	k. A.	k. A.	< 10	< 10
Hg [mg/kg]	< 0,05	k. A.	k. A.	< 0,1	< 0,1
Pb [mg/kg]	< 10	k. A.	k. A.	< 10	< 10
Zn [mg/kg]	< 100	k. A.	k. A.	< 100	< 100
Ni [mg/kg]	k. A.	k. A.	k. A.	< 10	< 10

## 4 Brennstofftechnische Eigenschaften und deren Bestimmung

In diesem Abschnitt wird die Vorgehensweise bei der Bestimmung des Asche- und Wassergehaltes und des Heizwertes aufgezeigt. Gleichzeitig werden die ermittelten Brennstoffkenndaten für die unterschiedlichen Proben dargestellt und die Ergebnisse diskutiert. Alle in diesem Abschnitt aufgeführten Werte wurden am Technologie- und Förderzentrum (TFZ) bestimmt.

### 4.1 Aschegehalt

Der anorganische Rückstand, der nach der Verbrennung eines biogenen Festbrennstoffs zurückbleibt, wird als Asche bezeichnet. Dieser Rückstand kann direkt vom Brennstoff stammen (bei nicht verunreinigten Brennstoffen). Er kann aber auch zusätzlich aus nicht von der eigentlichen Holzsubstanz stammenden mineralischen Verunreinigungen bestehen, die im Verlauf der Bereitstellungskette hinzukommen können.

Der Aschegehalt wird durch Berechnung aus der Masse des Rückstandes bestimmt, der nach dem Erhitzen einer Probe (1 g) unter klar definierten Bedingungen (CEN/TS 14 775 [13]) anfällt. Dabei ist die Ofentemperatur über eine Dauer von 50 Minuten gleichmäßig auf 250 °C zu erhöhen (Anstieg von 5 K/min). Diese Temperatur ist dann über 60 Minuten aufrechtzuerhalten, damit die flüchtigen Stoffe vor dem Verbrennen aus der Probe entweichen können. Anschließend ist die Ofentemperatur bei einem Anstieg von 5 K/min weiter gleichmäßig auf 550 °C zu erhöhen, um schließlich diese Temperatur über mindestens 120 Minuten beizubehalten. Der so anfallende Ascherückstand wird auf die trockene Gesamtmasse bezogen.

In Abbildung 2 sind die untersuchten Holzbrikettproben nach aufsteigendem Aschegehalt sortiert. Diese Reihenfolge wird auch für die weiteren Darstellungen beibehalten und entspricht ebenfalls der in Abbildung 1 verwendeten Nummerierung.

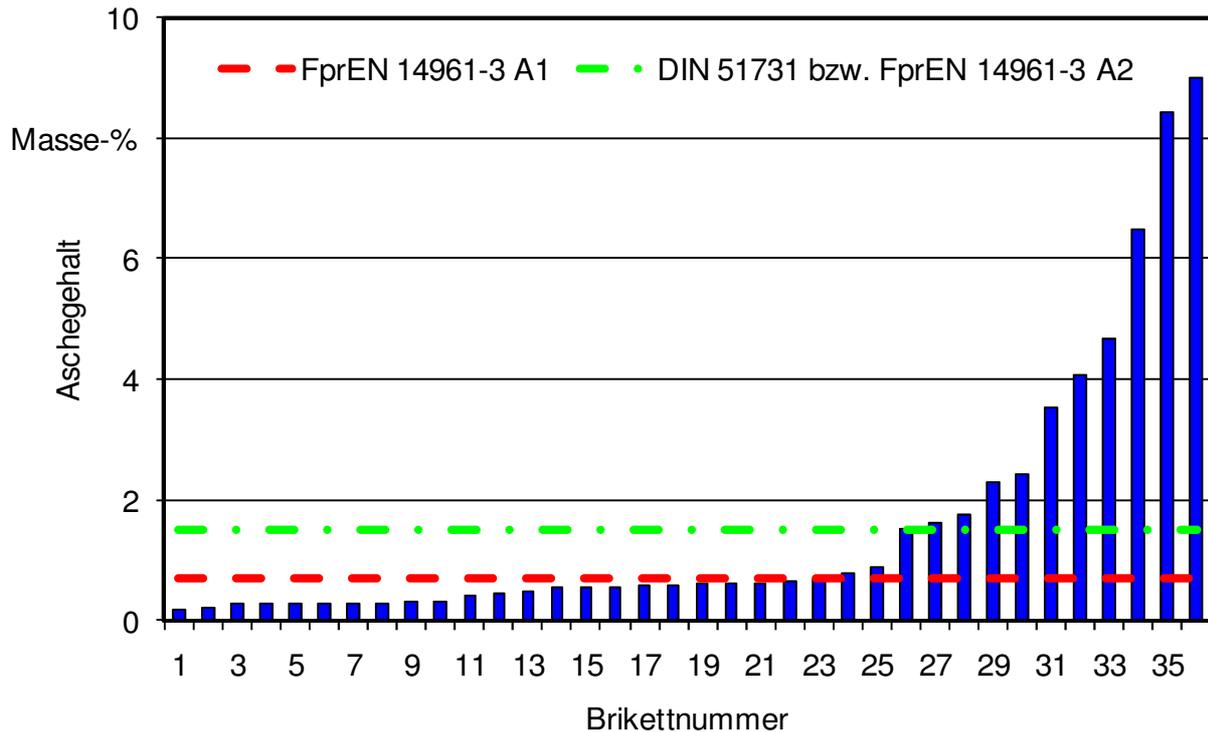


Abbildung 2: Aschegehalt der Holzbriketts, bezogen auf die Trockenmasse, mit Grenzwerten der jeweiligen Anforderungsnormen

Gleichzeitig sind die Grenzwerte der hier verwendeten Normen für die Brikettcharakterisierung mit eingezeichnet. 23 Holzbriketts weisen einen Aschegehalt kleiner 0,7 Masse-% (wf) auf und erfüllen somit alle Normen. Elf Holzbriketts zeigen einen Aschegehalt von mehr als 1,5 Masse-%. Die drei Holzbrikettproben mit den höchsten Aschegehalten halten nicht einmal den erhöhten Grenzwert von 6 Masse-% der ÖNORM M 7135 für ein Rindenbrikett ein. Bei den Brikettnummern 32 und 35 handelt es sich um reine Rindenbriketts, was z. T. den erhöhten Aschegehalt erklärt. Der maximale Aschegehalt von ca. 9 Masse-% ist jedoch nicht einem ausgewiesenen Rindenbrikett zuzuordnen und könnte evtl. aufgrund von Verunreinigungen während der Herstellung resultieren.

Im Vergleich zu den Holzbriketts enthält das untersuchte Braunkohlebrikett 4,2 Masse-% (wf) Asche und liegt somit im oberen Bereich der gefundenen Bandbreite.

## 4.2 Wassergehalt

Der Wassergehalt wird nach CEN/TS 14 774-2 bestimmt, indem eine gemahlene Brennstoffprobe bei einer Temperatur von 105 °C im Trockenschrank bis auf Massekonstanz an Luft getrocknet wird [12]. Aus dem Masseverlust der Probe lässt sich der Wassergehalt bestimmen.

Die nach dieser Methode erzielten Wassergehalte aller Holzbrikettproben sind in Abbildung 3 veranschaulicht. Der bei den Briketts gemessene Wassergehalt liegt bei durchschnittlich 6,7 Masse-% bezogen auf die feuchte Gesamtmasse. Bis auf ein Holzbriketttyp weisen alle Proben einen Wassergehalt von weniger als 10 Masse-% auf. Bei der Brikettnummer 35 mit einem Wassergehalt von ca. 11 Masse-% handelt es sich um eine Probe aus dem (überdachten) Außenlager des TFZs. Der erhöhte Wassergehalt könnte darin begründet sein, dass diese Briketts nicht in einer Schrumpffolie verpackt waren und somit Feuchtigkeit aus der Umgebung aufnehmen konnten. Vor Regen war diese Probe dennoch geschützt. Somit ist festzustellen, dass eine fachgerechte Lagerung der Holzbriketts wichtig ist, um sie vor Wasseraufnahme zu schützen. Alle hier untersuchten Briketts erfüllen jedoch die vorgegebenen Grenzwerte der deutschen bzw. der zukünftigen europäischen Norm.

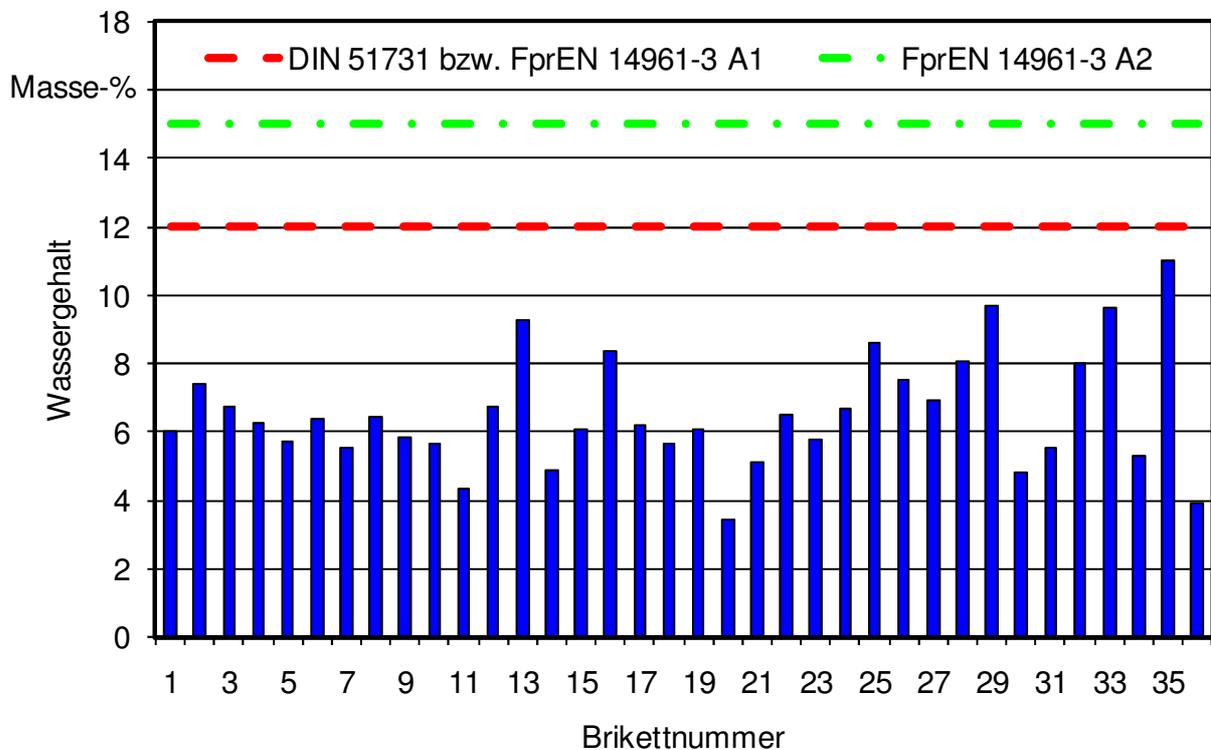


Abbildung 3: Wassergehalt der Holzbriketts, bezogen auf die Frischmasse, mit Grenzwerten der jeweiligen Anforderungsnormen

Der Wassergehalt der Braunkohlebriketts liegt höher als bei den Holz- und Rindenbriketts und beträgt 13 Masse-%.

### 4.3 Heizwert

Der Heizwert spiegelt den Energieinhalt eines Kilogramm Holzbricketts wider und wird nach der DIN 51 900-2 bestimmt [11]. Der Heizwert wird von Faktoren wie Brennstoffzusammensetzung, Asche- und Wassergehalt beeinflusst. In Abbildung 4 ist der Heizwert aller Holzbrickettproben dargestellt. Er liegt zwischen 17.580 kJ/kg und 20.220 kJ/kg (wf). Der minimale Wert kann dem Brikett Nummer 36, einem Eichenholzbrickett, und der maximale Wert der Nummer 14, einem Nadelholzbrickett, zugeordnet werden. Es ist allgemein bekannt, dass Hartholz einen geringeren Heizwert aufweist als Weichholz [16], was durch die hier vorgestellten Ergebnisse bestätigt wird. Der Mittelwert des gemessenen Heizwertes beträgt 18.760 kJ/kg (wf).

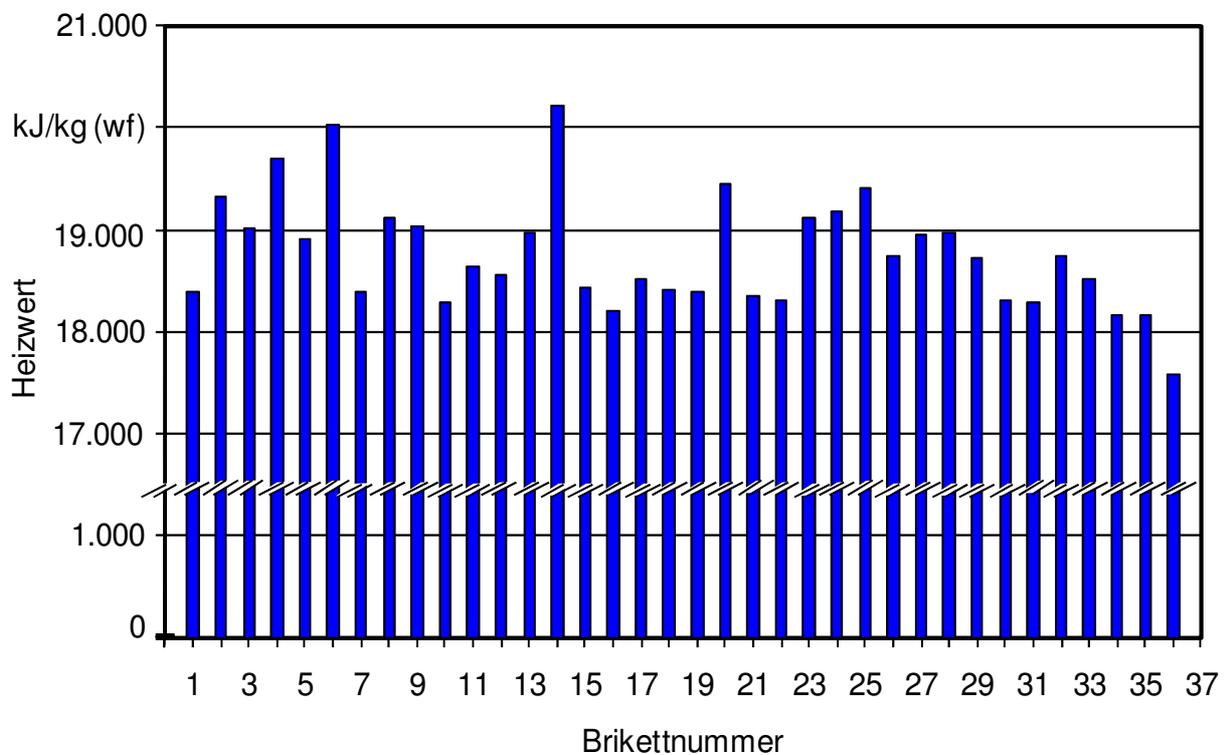


Abbildung 4: Heizwert der Holzbricketts, bezogen auf die Trockenmasse, keine Normanforderung eingezeichnet, da unterschiedliche Bezugsgrößen verwendet werden

Der Heizwert wird auch vom Aschegehalt beeinflusst. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 5 dargestellt. Bei geringen Aschegehalten bis ca. 1,5 Masse-% besteht keine klar erkennbare Abhängigkeit zwischen Heizwert und Aschegehalt. Erst ab einem Aschegehalt von mehr als 1,5 Masse-% wird der verminderte Einfluss des steigenden Aschegehaltes auf den Heizwert deutlich.

Der Heizwert des Braunkohlebricketts liegt mit 24.920 kJ/kg (wf) erwartungsgemäß höher als bei Holzbricketts. Dieser vergleichsweise hohe Heizwert lässt vermuten, dass es sich um eine Kohle mit Herkunft aus dem Rheinland handelt.

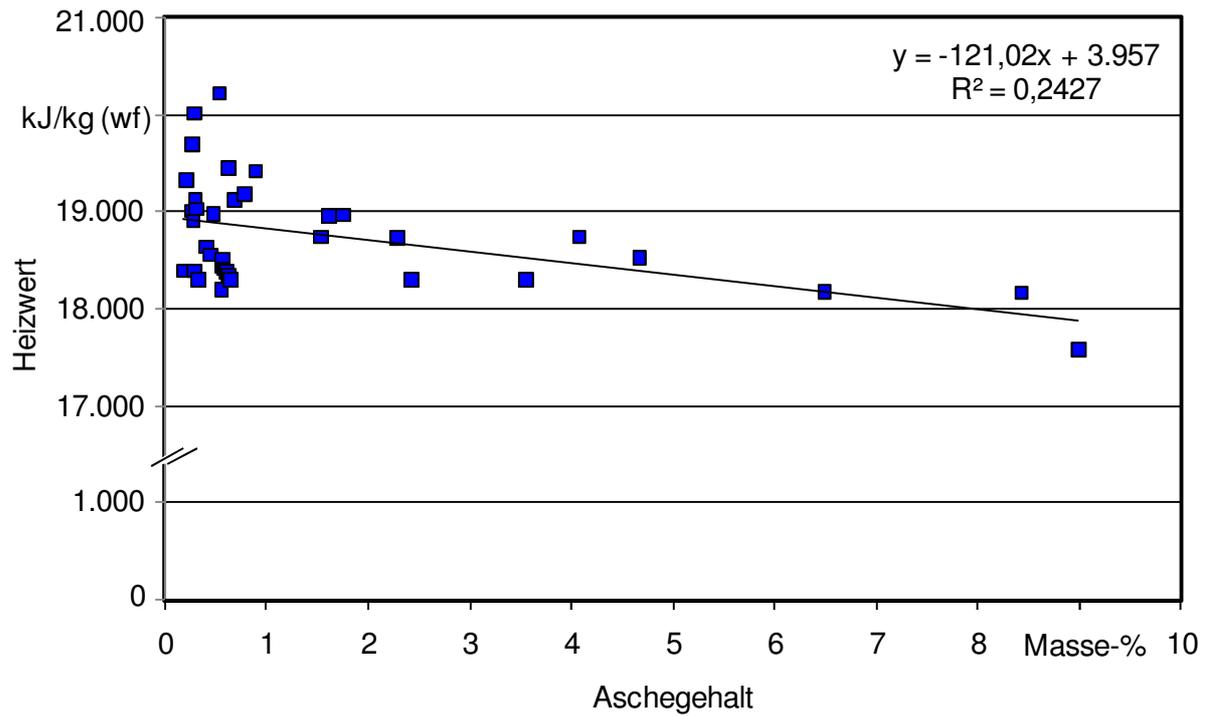


Abbildung 5: Abhängigkeit des Heizwertes vom Aschegehalt, jeweils bezogen auf die Trockenmasse



## 5 Physikalische Eigenschaften und deren Bestimmung

### 5.1 Teilchendichte

Die Teilchendichte, auch Rohdichte genannt, ist bei verdichtetem Material wie den Holzbriketts deutlich höher als bei Scheitholz. Je höher der Pressdruck während der Verdichtung ist, desto höher fällt die Teilchendichte aus. Jedoch ist dieser Zusammenhang nur bis zu einem bestimmten Pressdruck gültig, eine weitere Steigerung des Pressdruckes bewirkt nur noch eine unwesentliche Zunahme der Teilchendichte [18]. Gleichzeitig nimmt die Brenndauer mit höherer Teilchendichte zu, was die Nachlegeintervalle vergrößert [22], [23].

Die Teilchendichte wird gemäß CEN/TS 15 150 an 10 Proben der jeweiligen Brikettsorte bestimmt [3]. Hierfür stehen zwei Möglichkeiten zur Verfügung. Entweder wird die Teilchendichte durch Auftriebsmessung in einem Wasser-Tensid-Gemisch oder stereometrisch, d. h. durch Ausmessen der Holzbriketts, bestimmt. Bei der Auftriebsmessung wird das Volumen der Probe durch den hydrostatischen Auftrieb in der Flüssigkeit festgestellt. Der scheinbare Masseverlust zwischen der Messung an Luft und der Messung in der Flüssigkeit kennzeichnet dessen hydrostatischen Auftrieb. Das Volumen der Probe wird über die Dichte der Flüssigkeit berechnet. Das Tensid wird dem Wasser beigemischt, um eine zu starke Blasenbildung der Holzbriketts zu vermeiden. Die Ablesung des Messwertes erfolgt ca. 3 bis 5 Sekunden nach dem Eintauchen des Briketts in die Flüssigkeit.

Zu Vergleichszwecken wurde die Teilchendichte durch Ausmessen (stereometrische Bestimmung) ermittelt. In Abbildung 6 sind die Ergebnisse beider Bestimmungsmethoden dargestellt.

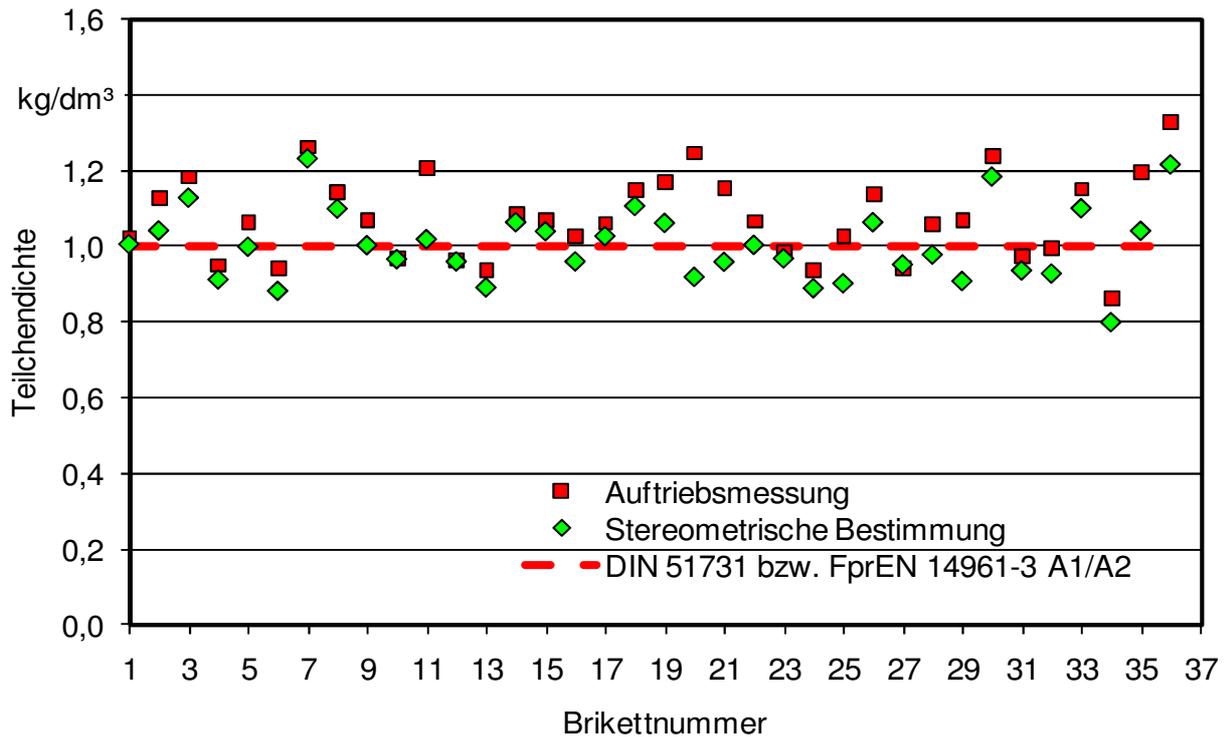


Abbildung 6: Teilchendichte der Holzbriketts, Auftriebsmessung bzw. stereometrische Bestimmung, mit Grenzwerten der jeweiligen Anforderungsnormen

Die Teilchendichte der Holzbriketts variiert zwischen  $0,86 \text{ kg/dm}^3$  und  $1,326 \text{ kg/dm}^3$  (bei Auftriebsmessung). Elf Holzbriketts weisen eine Teilchendichte von weniger als  $1 \text{ kg/dm}^3$  auf und erfüllen somit nicht die Normanforderungen. Hierbei handelt es sich ausschließlich um Ruf-Briketts. Alle anders geformten Briketts überschreiten die Teilchendichte von  $1 \text{ kg/dm}^3$ , wie in Abbildung 7 ersichtlich ist.

Zum Vergleich wurde auch die Teilchendichte des Braunkohlebriketts bestimmt. Sie liegt mit  $1,27 \text{ kg/dm}^3$  im oberen Bereich der Bandbreite der untersuchten Holz- und Rindenbriketts.

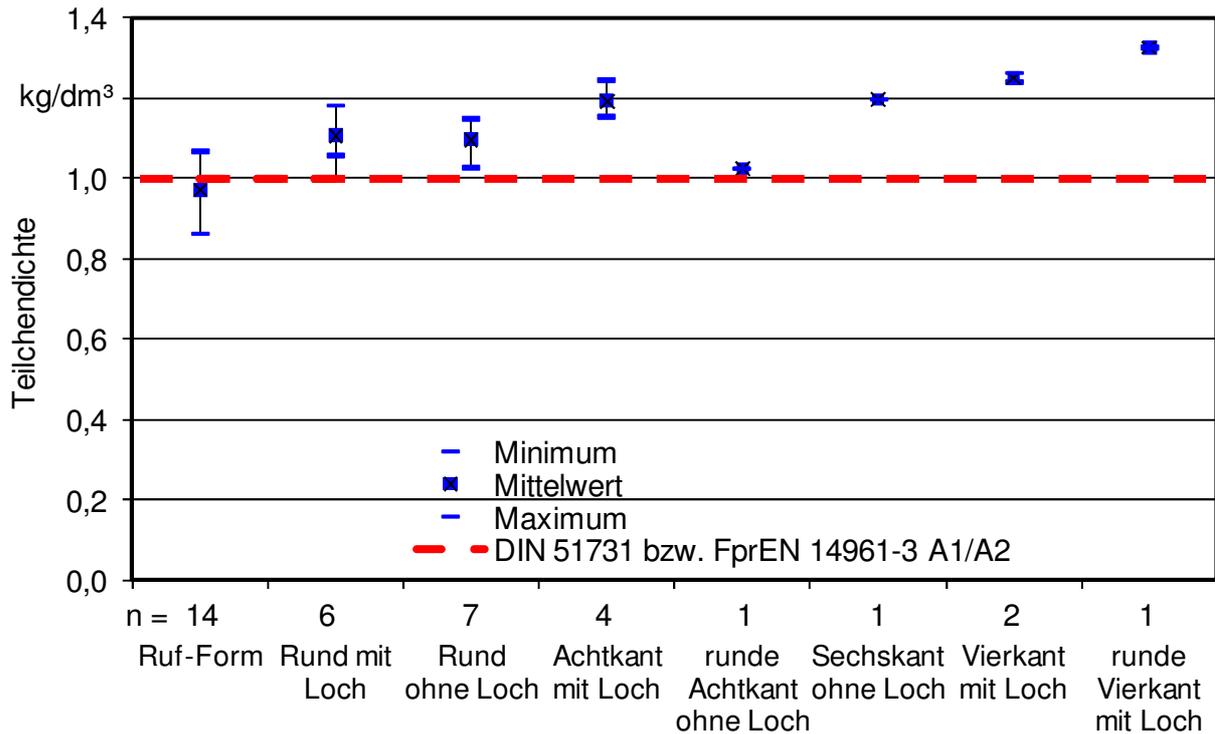


Abbildung 7: Teilchendichte der Holzbriketts in Abhängigkeit von der Brikettform sowie Bandbreite und Mittelwert der Messwerte.  $n$  ist die Anzahl der Brikettproben je Form

Weiterhin fällt in Abbildung 6 auf, dass die Teilchendichte beim Ausmessen der Briketts (stereometrische Bestimmung) geringer ausfällt als bei der Auftriebsmessung. Es wird somit das Volumen durch das Ausmessen aufgrund der unregelmäßigen Formen tendenziell überschätzt. Nach RABIER et al. ist die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse mittels Auftriebsmessung höher [22]. Diese Beobachtung wird auch hier bestätigt. Das zeigt die Berechnung des Variationskoeffizienten für jede Brikettprobe (Quotienten aus Standardabweichung und Mittelwert). Wie in Abbildung 8 zu sehen, ist der Variationskoeffizient bei Auftriebsmessung geringer; die Messergebnisse sind somit besser reproduzierbar als die Ergebnisse durch stereometrisches Ausmessen. Demzufolge liefert die Auftriebsmessung die zuverlässigeren Werte.

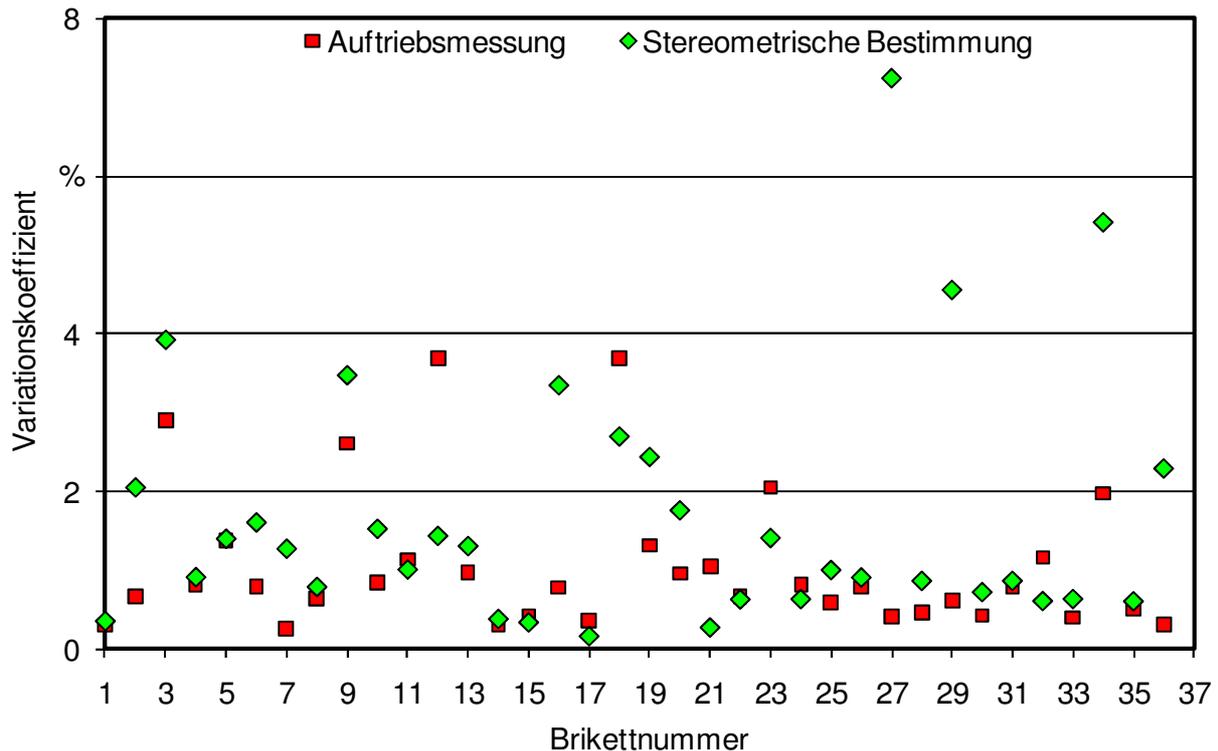


Abbildung 8: Variationskoeffizienten der Teilchendichtebestimmung

## 5.2 Abriebfestigkeit

Für die Handhabung von Holzbriketts ist die Abriebfestigkeit, auch mechanische Festigkeit genannt, im Vergleich zur Teilchendichte die bevorzugte Eigenschaft für die Beurteilung der Festigkeit von Holzbriketts. Je höher die Abriebfestigkeit ist, desto beständiger gegenüber mechanischen Beschädigungen ist das Brikett (z. B. bei Stößen und Abrieb während des Transports und der Handhabung). Ein fester Grenzwert für Holzbriketts wurde bislang in keiner Norm festgelegt. Dennoch wurde hier die Abriebfestigkeit nach CEN/TS 15 210-2 für alle Briketts bestimmt [4]. Für Holzpellets liegt der Grenzwert gemäß europäischen Norm bei 97,5 % [8].

Die Abriebfestigkeit wurde gemäß Normvorgabe mittels Abriebtester, einer rotierenden, liegenden, zylindrischen Stahltrommel mit ca. 60 cm Durchmesser und 60 cm Tiefe, die im Inneren mit einer Prallplatte versehen ist, durchgeführt. Hierzu wurde die Trommel jeweils mit mindestens 2 kg einer Holzbrikettsorte beladen und durch Rotation über insgesamt 105 Umdrehungen einer definierten mechanischen Beanspruchung ausgesetzt. Wenn bereits ein Brikett eine Masse von mehr als 2 kg aufwies, so wurde kein weiteres Brikett in die Trommel gegeben. Keines der Briketts wurde für diese Versuche gesägt oder gebrochen, auch nicht die zylindrischen Proben. Für jede Holzbrikettsorte wurden fünf Wiederholungsmessungen durchgeführt.

In Abbildung 9 sind die Ergebnisse der Abriebtests für jede Brikettsorte dargestellt. Die Abriebfestigkeit liegt zwischen 90,6 % und 99,7 %. Das Brikett mit der geringsten Abriebfestigkeit von 90,6 % war ein rundes Brikett ohne Loch, es zerfiel bei der mechanischen

Behandlung rasch in einzelne Scheiben. Die hier gemessene mittlere Abriebfestigkeit aller Briketts beträgt 97,9 %.

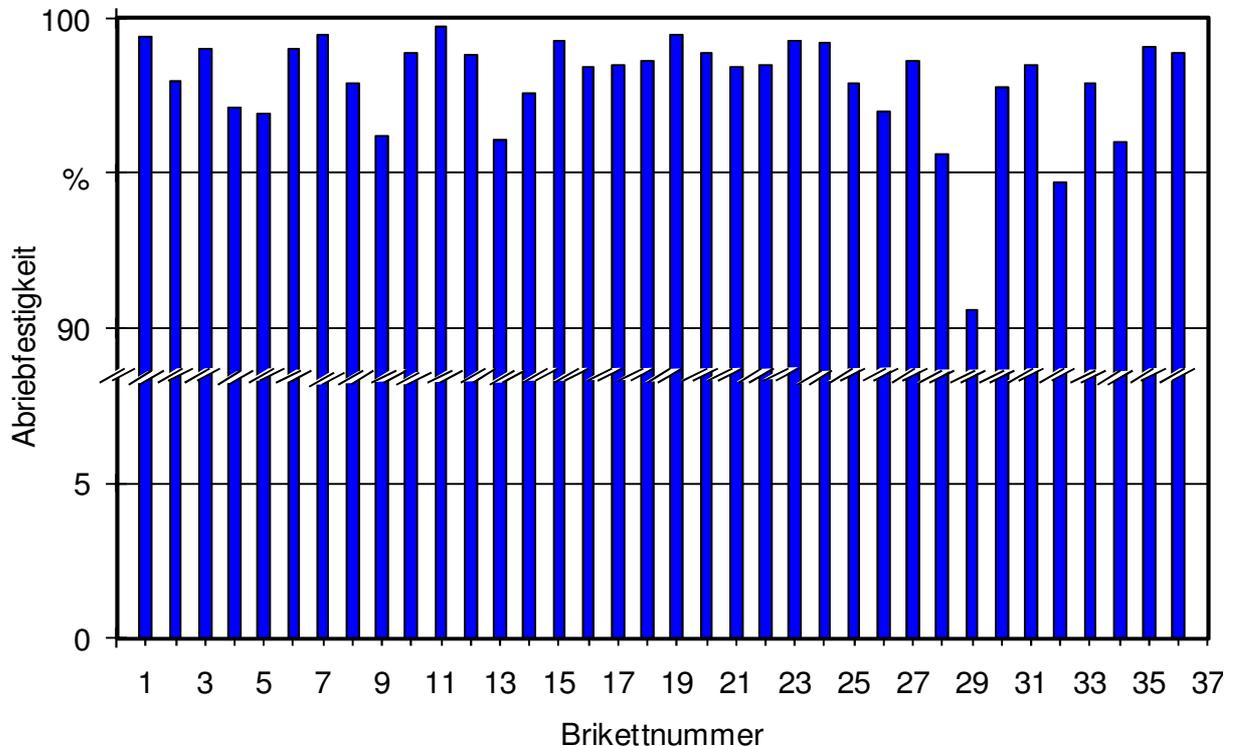


Abbildung 9: Abriebfestigkeit der untersuchten Holzbriketts (keine Normanforderungen vorhanden)

Weiterhin ist in Abbildung 10 abzulesen, dass runde Briketts (ohne Loch) hier im Mittel eine geringere Abriebfestigkeit aufweisen als anders geformte Briketts. Bereits runde Briketts mit Loch weisen eine etwas höhere Stabilität auf. Die höchsten Werte für die Abriebfestigkeit konnten für Briketts ermittelt werden, welche mehrkantig sind und eine dunkle Oberfläche aufgrund des „verflüssigten“ Lignins beim Pressen aufweisen. Wenn man für Holzbriketts den gleichen Qualitätsmaßstab wie für Pellets anlegen würde, so wäre die Forderung nach einer Abriebfestigkeit von mindestens 97,5 % bei 27 von 36 untersuchten Holzbriketts erfüllt.

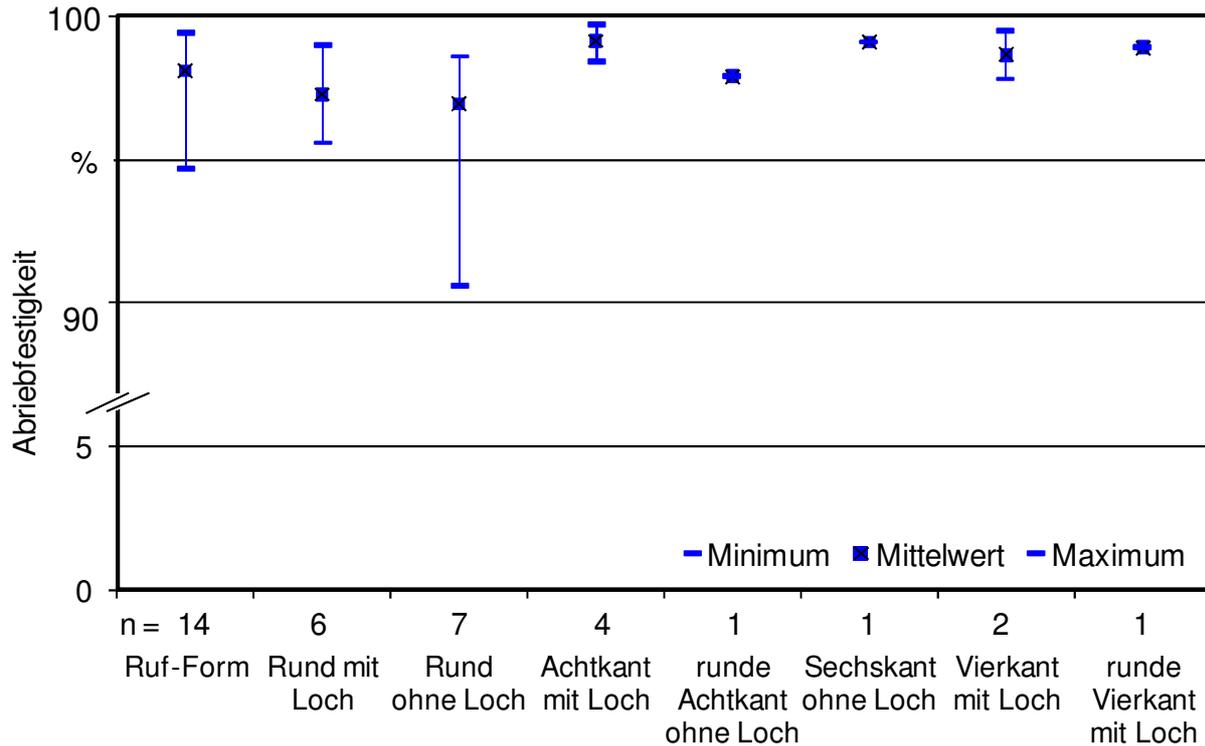


Abbildung 10: Abriebfestigkeit nach Brikettform mit dem Minimum, Mittelwert und Maximum sortiert.  $n$  ist die Anzahl der Brikettproben je Form.

Frühere Untersuchungen hatten bereits einen Zusammenhang zwischen der gemessenen Abriebfestigkeit und der ebenfalls bestimmten Teilchendichte vermutet, jedoch konnte dies bislang nicht klar bestätigt werden [23]. Auch in der vorliegenden Untersuchung bot sich eine Überprüfung dieses Zusammenhangs an. Jedoch zeigte sich, dass die gemessene Teilchendichte offenbar ohne Wirkung auf die Festigkeit gegenüber mechanischer Beanspruchung bleibt. Somit muss beim Erzielen einer hohen Brikettdichte vor allem der Vorteil der besseren Lagerraumausnutzung gesehen werden.

Für das Braunkohlebrikett konnte eine verhältnismäßig geringe Abriebfestigkeit von 97,2 % bestimmt werden. Es liegt somit im Rahmen der auch für Holzbriketts üblichen Bandbreite.

## 6 Stoffliche Zusammensetzung der Holzbriketts

Nach der Bestimmung der brennstofftechnischen und physikalischen Eigenschaften sollte zur Vervollständigung der Charakterisierung auch die stoffliche Zusammensetzung der Holzbriketts ermittelt werden. Die Hauptbestandteile von Holz sind die Elemente Kohlenstoff (C), Sauerstoff (O) und Wasserstoff (H) sowie Stickstoff (N), Schwefel (S) und Chlor (Cl). Weitere Hauptkomponenten sind Kalzium (Ca), Kalium (K), Magnesium (Mg) und z. T. Silizium (Si). Teilweise können Holzbrennstoffe auch mit Schwermetallen wie Cadmium (Cd), Blei (Pb), Zink (Zn), Chrom (Cr), Kupfer (Cu), Arsen (As), Quecksilber (Hg) oder Nickel (Ni) in Spuren belastet sein. Letztere können dann oftmals als Indikator für Verunreinigungen oder eine nicht naturbelassene Herkunft gelten. Außerdem wurde der Gehalt von Natrium mit ermittelt. Alle Analysen bezüglich der stofflichen Zusammensetzung wurden von einem externen Labor durchgeführt.

### 6.1 Hauptelemente

**Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff.** Biomasse setzt sich hauptsächlich aus C, H und O zusammen. Die freigesetzte Energie wird weitgehend durch die Oxidation von Kohlenstoff und Wasserstoff bestimmt. Der im Brennstoff enthaltene Sauerstoffanteil unterstützt den Oxidationsvorgang [16].

Die Anteile dieser Hauptelemente in den untersuchten Brikettproben sind in Abbildung 11 dargestellt. Wie gezeigt, ändert sich der Wasserstoffanteil nur sehr geringfügig, er beträgt durchschnittlich 5,8 Masse-% (wf). Bezüglich des Kohlenstoff- und Sauerstoffanteils fallen hier die Änderungen etwas stärker aus. Im Durchschnitt bestehen die Holzbriketts zu 50,1 Masse-% aus Kohlenstoff und zu 43,9 Masse-% aus Sauerstoff. Der geringste C-Anteil in Brikettnummer 36 korreliert mit dem geringsten Heizwert, vgl. Abbildung 4.

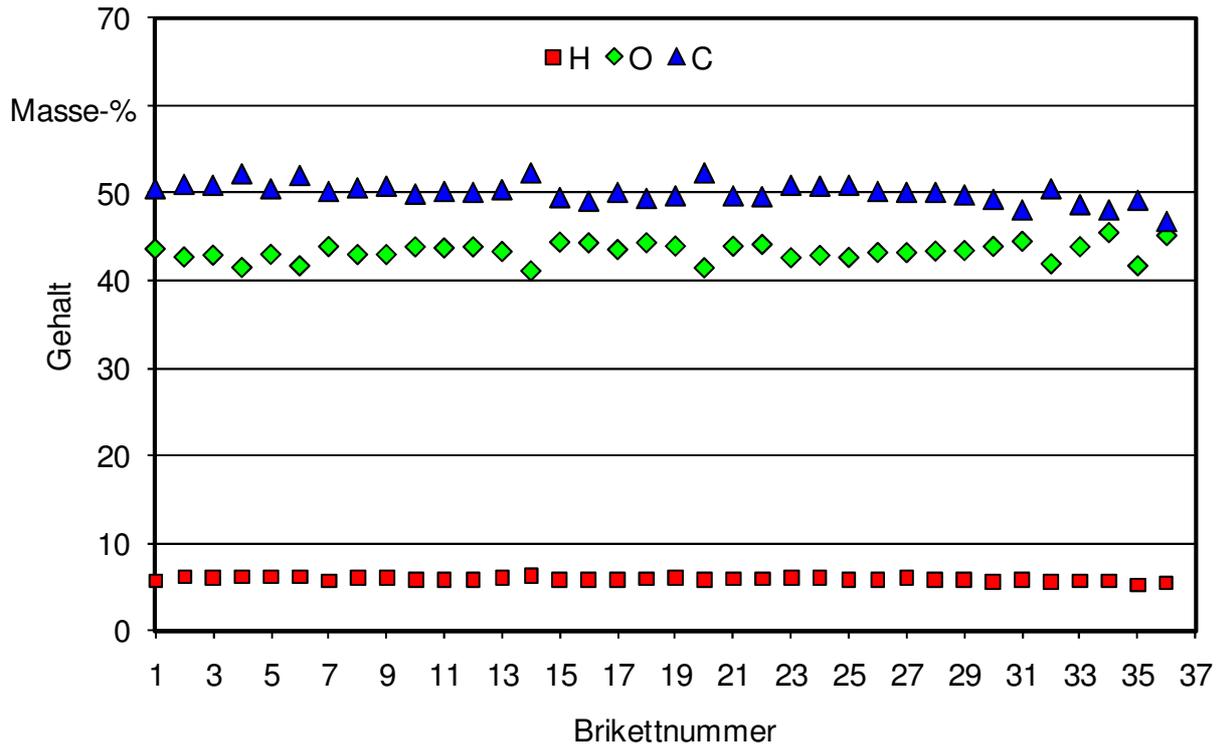


Abbildung 11: Hauptkomponenten C, H und O der Holzbriketts, bezogen auf die Trockenmasse (keine Normanforderungen vorhanden)

Das Braunkohlebrikett weist erwartungsgemäß einen höheren Kohlenstoffanteil von 65,3 Masse-% auf. Entsprechend geringer ist der Wasserstoffgehalt mit 4,7 Masse-% und der Sauerstoffgehalt mit ca. 29 Masse-%.

**Kalzium, Kalium und Magnesium.** Alle drei Elemente beeinflussen den Schmelzpunkt der Biomasseasche, wobei vor allem Kalzium schmelzpunkterhöhend wirkt, während Kalium den Schmelzpunkt absenkt. Außerdem ist Kalium an Korrosionsvorgängen beteiligt, da sich bei der Verbrennung gasförmige Alkalichloride bilden, die sich an Wärmeübertragerflächen oder an Flugstaubpartikeln rückverfestigen können [16]. Es zählt daher zu den aerosol- (d. h. Feinstaub) bildenden Elementen. Mg und Ca sind nicht leicht flüchtig und tragen somit nicht nennenswert zur Aerosolbildung bei der Verbrennung bei [1]. Beide Elemente werden somit vorrangig in die Asche eingebunden [19]. Nach FRANSEN et al [15] ist Kalzium der dominierende Anteil der Aschebildung und führt gleichzeitig dazu, dass große Teile des Schwefels in der Asche verbleiben und nicht als Schwefeldioxid im Abgas wiederzufinden ist [16].

In Abbildung 12 sind die in allen Holzbrikettproben gemessenen Gehalte an Kalzium (Ca), Kalium (K) und Magnesium (Mg) dargestellt. Im Durchschnitt sind 828 mg/kg (wf) Kalium und 318 mg/kg Magnesium enthalten, wobei die Werte für Magnesium kaum schwanken. Nach BRUNNER [1] deuten erhöhte Kaliumwerte auf die Verwendung von Hartholz hin. Außerdem ist der Kaliumanteil in Rinde normalerweise höher als in reinem Holz [20], was hier jedoch nur für eines der beiden Rindenbriketts bestätigt werden kann. Eine größere Schwankungsbreite kann für den Kalziumanteil in Abbildung 12 festgestellt

werden, er beträgt durchschnittlich 2.139 mg/kg (wf). Weiterhin ist auffallend, dass Kalzium mit zunehmendem Aschegehalt tendenziell ansteigt, obgleich nicht in allen Fällen mit erhöhtem Aschegehalt auch ein höherer Kalziumgehalt vorliegt. Beide Maximalwerte für Kalzium in Höhe von 13.000 bzw. 16.000 mg/kg (wf) können den ausgewiesenen Rindenbriketts zugeordnet werden.

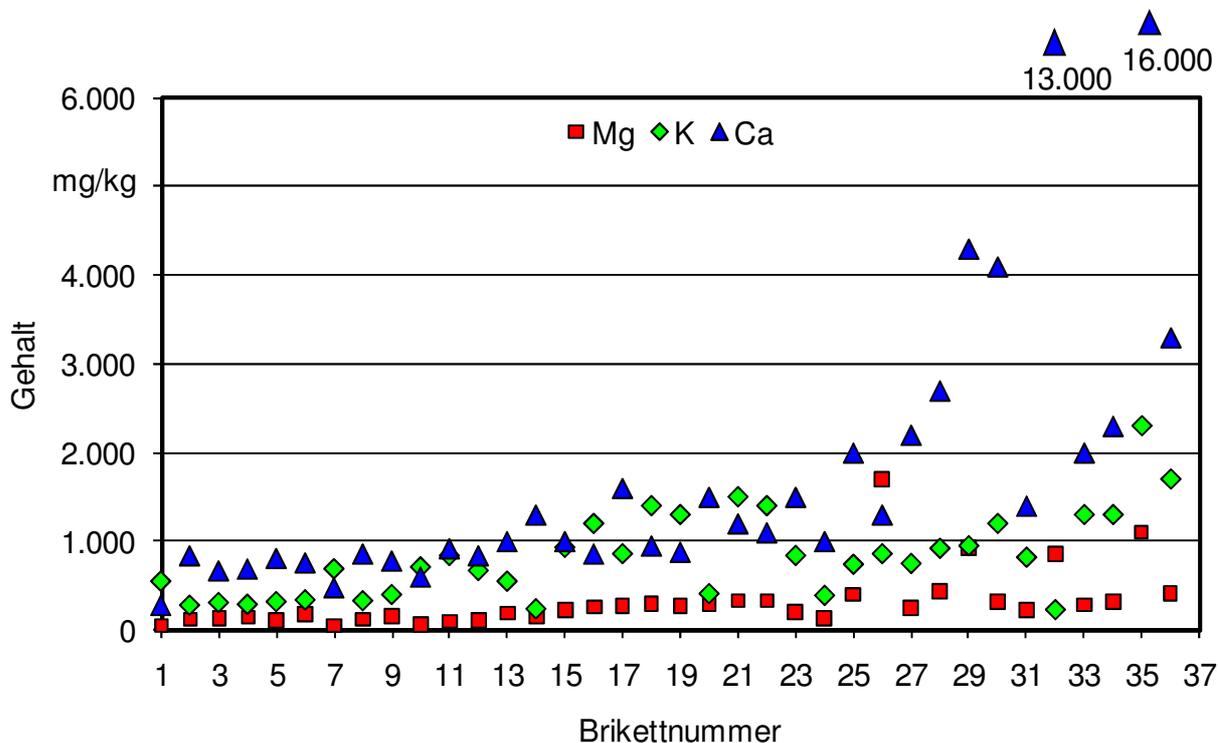


Abbildung 12: Ca-, K- und Mg-Gehalt, bezogen auf die Trockenmasse (keine Normanforderungen vorhanden)

Bei dem untersuchten Braunkohlebrikett waren 10.000 mg/kg Kalzium, 240 mg/kg Kalium und ein deutlich höherer Anteil an Magnesium in Höhe von 3.900 mg/kg (wf) enthalten.

**Stickstoff.** Der Stickstoffgehalt (N) bei naturbelassenem Holz ist gering, so dass er in 21 Brikettproben unterhalb der Nachweisgrenze von 0,05 Masse-% (wf) liegt. Im Vergleich zum rindenfreien Holz fällt der N-Anteil der Rinde etwas höher aus, was auch in Abbildung 13 dargestellt ist: Beide Rindenbriketts (Nr. 32 und 35) überschreiten den ersten Grenzwert, jedoch werden die Grenzwerte der FprEN 14 961-3 (Schluss-Entwurf) der Klasse A2 für rindenhaltige Briketts noch eingehalten. Der maximale N-Gehalt beträgt 0,45 Masse-% und ist in Probe Nummer 16 zu finden, welche eigentlich der DIN 51 731 gemäß Deklaration entsprechen sollte. In Abbildung 13 wird jedoch deutlich, dass der Grenzwert von 0,3 Masse-% überschritten wird. Dieser erhöhte Stickstoffgehalt könnte darauf hinweisen, dass bei der Herstellung nicht nur naturbelassenes Holz verwendet wurde [20]. Der im Brennstoff enthaltene Stickstoff wirkt sich direkt auf die Stickoxidbil-

ung während des Verbrennungsprozesses aus, da dieses Element bei der Verbrennung fast vollständig in die Gasphase übergeht. Eine Einbindung des Stickstoffs in die Asche findet kaum statt [16].

Der Stickstoffgehalt im Braunkohlebrikett fällt im Vergleich zu den Holzbriketts höher aus und beträgt 0,74 Masse-% (wf). Er ist damit um das 3,8-fache höher als der Durchschnitt der Holz- und Rindenbriketts, der bei 0,19 Masse-% liegt (Mittelwertbildung mit Berücksichtigung der Nachweisgrenze als Messwert).

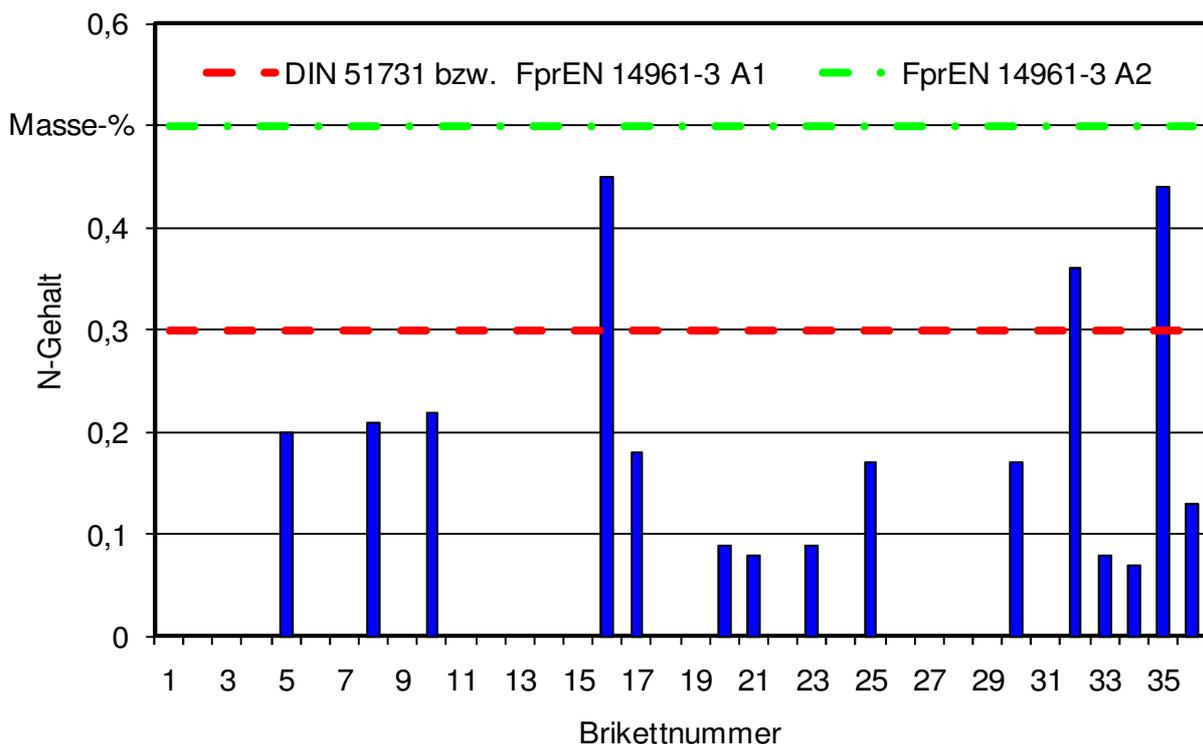


Abbildung 13: Stickstoffgehalt der Holzbriketts, bezogen auf die Trockenmasse, mit Grenzwerten der jeweiligen Anforderungsnormen

**Schwefel.** Der Schwefelgehalt (S) fällt geringer aus als der Stickstoffgehalt, er ist in Abbildung 14 dargestellt. Bei acht Brikettproben liegt der Schwefelgehalt unterhalb der Nachweisgrenze von 0,01 Masse-% (wf). Allgemein enthält naturbelassenes Holz einen geringen Anteil an Schwefel. Der Anteil an Schwefel in der Rinde fällt erwartungsgemäß mit 0,03 bis 0,04 Masse-% höher aus als im Holz, dennoch erfüllen beide Rindenbriketts die Normvorgaben. Eine Ausnahme bildet Brikettnummer 14 mit einem Schwefelgehalt von 0,09 Masse-% (wf), es erfüllt keine der in Abbildung 14 dargestellten Normanforderungen.

Der Schwefelgehalt bestimmt primär die Schwefeldioxid-Emissionen, wobei der Schwefel bei der Verbrennung unter Bildung von  $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$  und Alkalisulfatstufen hauptsächlich in die Gasphase übergeht [16]. Beim Abkühlen der Abgase kommt es teilweise zur Kondensation und die schwefelhaltigen Komponenten lagern sich beispielsweise an

Wärmeübertragerflächen ab und führen zur Korrosion. Der im Brennstoff enthaltene Schwefel wird in Abhängigkeit vom Abscheidegrad der Entstaubungseinrichtung zu 40 bis 90 % in die Asche eingebunden [16].

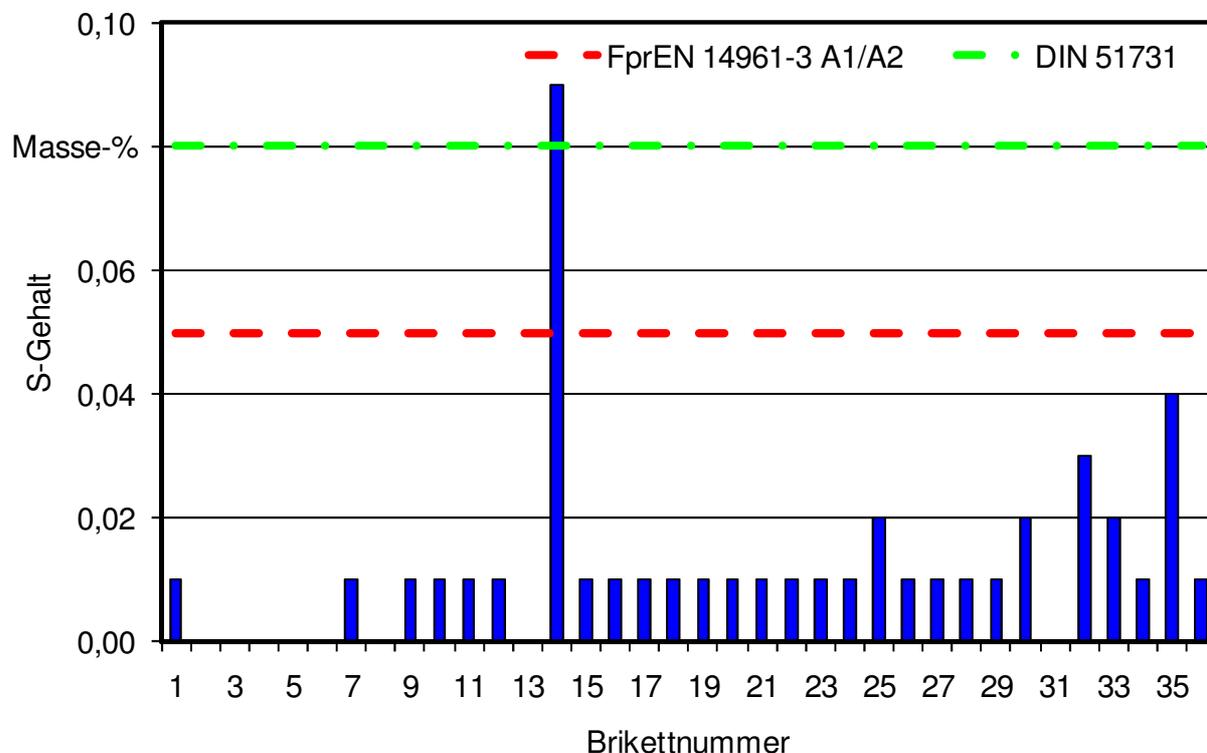


Abbildung 14: Schwefelgehalt der Holzbriketts, bezogen auf die Trockenmasse, mit Grenzwerten der jeweiligen Anforderungsnormen

Der Schwefelanteil im Braunkohlebrikett beträgt 0,3 Masse-% (wf).

**Chlor.** Chlor (Cl) konnte in 25 Holzbrikettproben nicht nachgewiesen werden und liegt somit unter 0,005 Masse-% bzw. 50 mg/kg (wf). Die beiden Rindenbriketts weisen aber einen erhöhten Chlorgehalt von 0,012 bzw. 0,023 Masse-% auf. Sie erfüllen jedoch die Anforderungen nach DIN 51 731 aber nur eines der Rindenbriketts erfüllt die schärferen Anforderungen der FprEN 14 961-3 (Schluss-Entwurf). Brikettnummer 25 weist den höchsten Chlorgehalt von 0,026 Masse-% (wf) auf (Abbildung 15). Das im Brennstoff enthaltene Chlor kann zur Dioxin- und Furanbildung wie auch der Bildung von Chlorwasserstoff (HCl) beitragen [16]. Zusätzlich wirkt Chlor im Zusammenspiel mit Alkali- und Erdalkalimetallen und mit Schwefeldioxid beispielsweise an Oberflächen von Wärmeübertragern korrosiv. Circa 40 bis 95 % des Chlors wird in die Asche eingebunden [16]. Bezüglich der Partikelemissionen zählt Chlor wie Schwefel zu den leicht flüchtigen Komponenten und fungiert als Aerosolbildner [16]. Somit kann ein erhöhter Chlorgehalt auch zu steigenden Partikelemissionen führen.

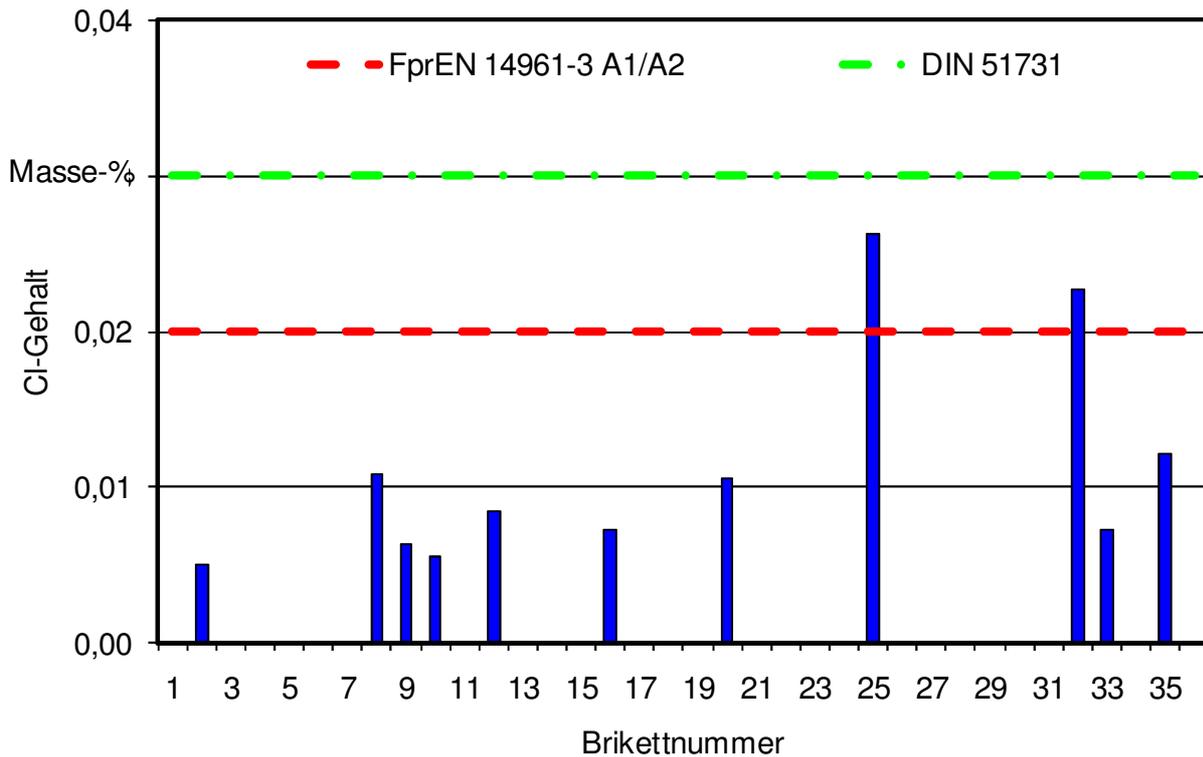


Abbildung 15: Chlorgehalt der Holzbriketts, bezogen auf die Trockenmasse, mit Grenzwerten der jeweiligen Anforderungsnormen

Das Braunkohlebrikett besteht zu 0,027 Masse-% (wf) aus Chlor.

## 6.2 Spurenelemente und Schwermetalle

Zu den im Rahmen des Holzbrikettscreenings durchgeführten Analysen wurden ebenfalls Silizium (Si) und Natrium (Na) sowie die Gehalte der Schwermetalle Arsen (As), Blei (Pb), Cadmium (Cd), Chrom (Cr), Kupfer (Cu), Nickel (Ni), Quecksilber (Hg) und Zink (Zn) bestimmt. Von besonderem Interesse sind die leicht flüchtigen Schwermetalle Cd, Pb und Zn, die ebenfalls zu den Aerosolbildnern zählen [19]. Außerdem ist die Schwermetallbelastung entscheidend für die Aschequalität und deren eventueller Weiterverwendung.

**Kupfer, Nickel und Chrom.** In Abbildung 16 sind die Schwermetalle Cu, Ni und Cr aller Holzbrikettproben dargestellt. In der deutschen Norm DIN 51 731 wurde nur ein Grenzwert für Chrom in Höhe von 8 mg/kg bzw. für Kupfer in Höhe von 5 mg/kg festgelegt. Im Gegensatz dazu sind alle drei Komponenten in der FprEN 14 961-3 (Schluss-Entwurf) mit einem einheitlichen Grenzwert von 10 mg/kg (wf) limitiert. Bei den Analysen konnten in 14 Fällen keine Werte für Cr und Ni aufgrund der Unterschreitung der Nachweisgrenze von 1 mg/kg (wf) ermittelt werden, ebenso neunmal für Cu. Bezüglich des Kupfers konnte keine Grenzwertüberschreitung in Bezug auf die FprEN 14 961-3 (Schluss-Entwurf)

festgestellt werden, lediglich eine geringe Zunahme mit steigendem Aschegehalt ist in Abbildung 16 ersichtlich. In fünf Brikettproben wird der Grenzwert bezüglich Nickel zum Teil um das mehr als Dreifache überschritten. Deutliche Überschreitungen können bei Chrom festgestellt werden. Hierbei liegen die Werte bei maximal 77 mg/kg (wf), was einer fast achtfachen Überschreitung des Grenzwertes der FprEN 14 961-3 (Schluss-Entwurf) entspricht. Eins der beiden Rindenbriketts (Nr. 35) würde somit bezüglich Cr und Ni nicht die Norm erfüllen, während das zweite Rindenbrikett (Nr. 32) keinerlei Auffälligkeiten zeigt und somit die allgemeine Aussage, dass Rinde schwermetallbelasteter ist, widerlegt.

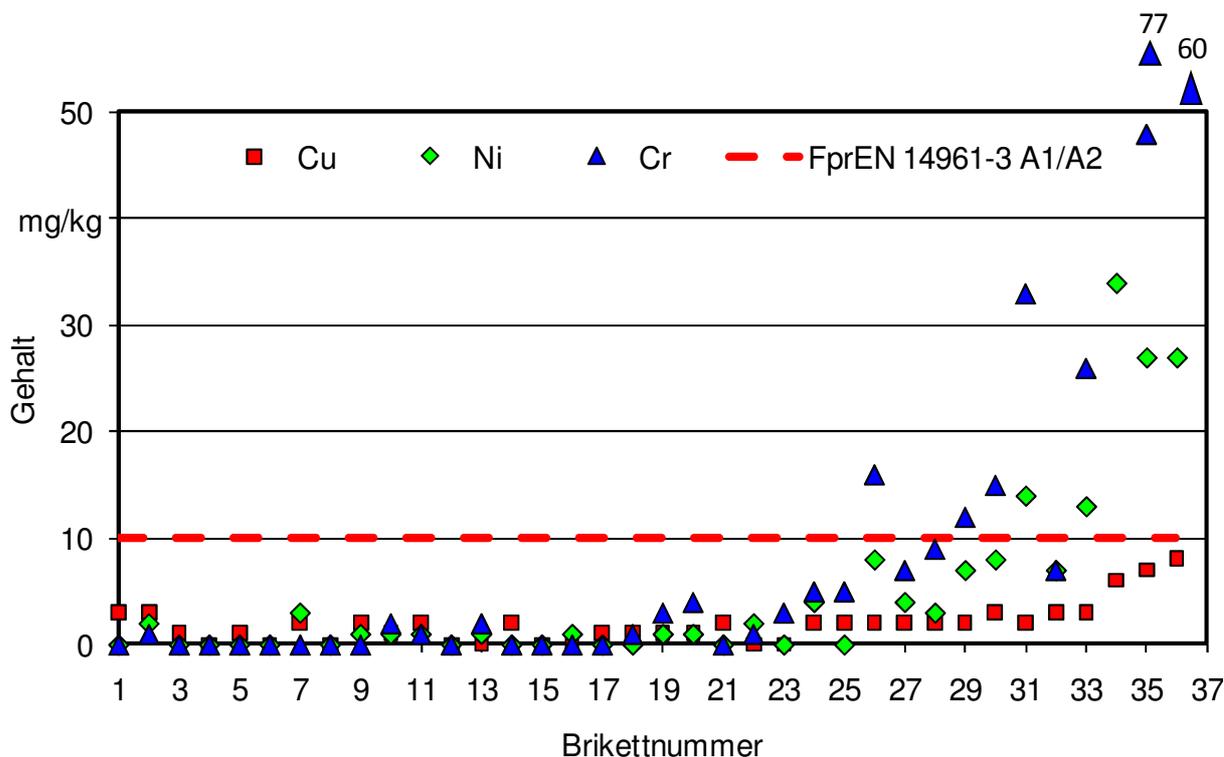


Abbildung 16: Gehalt an Cu, Ni und Cr der Holzbriketts, bezogen auf die Trockenmasse, mit Grenzwerten der jeweiligen Anforderungsnormen (einheitlicher Grenzwert in FprEN 14 961-3, A1/A2)

Bei dem Braunkohlebrikett war nur Chrom mit einem Gehalt von 4 mg/kg (wf) nachweisbar.

**Natrium und Zink.** Die Elemente Natrium und Zink zählen zu den leicht flüchtigen Bestandteilen und gelten deswegen als Aerosolbildner während der Verbrennung [1]. Für Natrium existiert aber keine Normanforderung.

Abbildung 17 zeigt, dass der Na-Gehalt schwankt und mit Zunahme des Aschegehaltes tendenziell ansteigt. Der maximale Natriumgehalt beträgt 390 mg/kg (wf) und trifft hier mit dem maximalen Aschegehalt zusammen. In zehn Brikettproben lag der Na-Gehalt unterhalb der Nachweisgrenze von 10 mg/kg.

Für Zink ist dagegen sowohl in der DIN 51 731 als auch in der FprEN 14 961-3 (Schluss-Entwurf) für die Klassen A1 und A2 ein Grenzwert definiert, er liegt bei 100 mg/kg. Bei beiden Rindenbriketts wird ein erhöhter Zinkgehalt erkennbar, er beträgt 97 bzw. 130 mg/kg (wf). Somit erfüllt das Brikett mit der Nummer 35 nicht die Normanforderung. Eine mehr als zehnfache Überschreitung des Grenzwertes für Zink wurde für Brikett-Nummer 21 festgestellt (Abbildung 17). Die Ursache dafür ist nicht bekannt, zumal es sich hier nicht einmal um ein ausgewiesenes Rindenbrikett handelt. In Rindenbriketts hatten OBERNBERGER UND THEK [20] ebenfalls teilweise erhöhte Zink-Werte mit bis zu 170 mg/kg (wf) nachgewiesen.

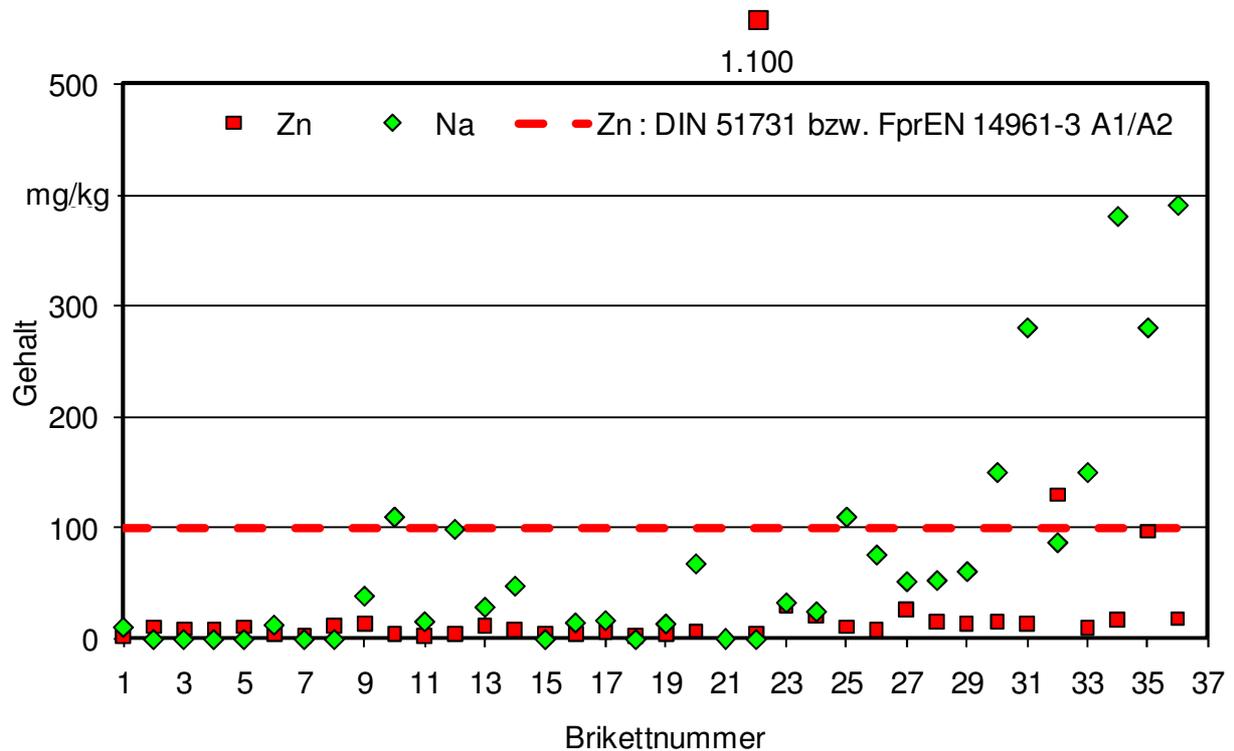


Abbildung 17: Na- und Zn-Gehalt der Holzbriketts, bezogen auf die Trockenmasse, mit Zn-Grenzwert der jeweiligen Anforderungsnorm

Im Braunkohlebrikett sind 2.000 mg/kg Natrium sowie 3 mg/kg (wf) Zink enthalten. Somit enthält dieser Brennstoff deutlich mehr Natrium als Holzbriketts, während beim Zn-Gehalt keine Unterschiede erkennbar sind.

**Weitere Schwermetalle.** Neben den bereits aufgezeigten Schwermetallen wurden die Gehalte an Quecksilber, Arsen, Blei und Cadmium ermittelt. Quecksilber liegt immer unterhalb der Nachweisgrenze von 0,07 mg/kg (wf) und spielt somit keine Rolle im Rahmen dieser Untersuchungen. Diese Nachweisgrenze für Quecksilber wäre für den Nachweis der Übereinstimmung mit der FprEN 14 961-3 (Schluss-Entwurf) ausreichend, jedoch nicht bei Bezug auf die derzeit noch gültige deutsche Norm (vgl. hierzu Tabelle 1).

Ein sehr ähnliches Bild ergibt sich für Arsen, welches einzig im Brikett mit der Nummer 25 in einer Konzentration von 1,3 mg/kg (wf) nachweisbar war. Gleichzeitig stellt dieser Wert aber schon eine Grenzwertüberschreitung für das Element Arsen dar, sowohl bei Bezug auf die DIN 51 731 als auch auf die FprEN 14 961-3 (Schluss-Entwurf).

Das Element Blei war in elf Proben nachweisbar, der Maximalwert beträgt hier 3 mg/kg (wf) und erfüllt somit alle Normanforderungen. Da Blei bei der Verbrennung leicht flüchtig ist, zählt es ebenfalls zu den Aerosolbildnern [1]. Für Cadmium konnten acht Gehalte bestimmt werden, alle anderen Werte lagen unterhalb der Nachweisgrenze von 0,2 mg/kg. Im Brikett Nr. 24 konnte ein grenzwertüberschreitender Wert von 0,6 mg/kg (wf) festgestellt werden.

Alle Gehalte an Schwermetallen der Briketts können der Tabelle 4 im Anhang entnommen werden.

Im Braunkohlebrikett fanden sich keine Belastungen bezüglich Quecksilber, Blei, Arsen oder Cadmium. Somit ist auch hier nicht von generellen Unterschieden zu Holzbriketts auszugehen.

Die häufig anzutreffende Aussage, dass Holzrinde stärker mit Schwermetallen belastet ist wie in [20] behauptet, kann nicht für alle Schwermetalle bei dieser Holzbrikettuntersuchung bestätigt werden. Denn so sind beispielsweise die Werte für Cr, Cu und Ni des Rindenbriketts mit der Nummer 32 nicht deutlich höher als die restlichen Holzbriketts. Die Brikettnummer 35 würde jedoch die Behauptung zutreffen.

**Silizium.** Wegen seiner Bedeutung für das Ascheschmelzverhalten wurde auch der Gehalt an Silizium in allen Holzbrikettproben bestimmt. Für die ersten 12 Brikettproben, die nach dem Aschegehalt aufsteigend sortiert nummeriert waren, konnte kein Silizium nachgewiesen werden, wobei die Nachweisgrenze hier bei 50 mg/kg (wf) lag. Ab Probennummer 26 ist in Abbildung 18 ein Anstieg des Si-Gehaltes erkennbar. Die höchsten Si-Gehalte konnten für die letzten beiden Brikettproben Nummer 35 und 36 festgestellt werden, wobei es sich bei Nummer 35 um eines der beiden ausgewiesenen Rindenbriketts handelt. Bei Nummer 36 beträgt der Siliziumgehalt 1,9 Masse-%, was den recht hohen Aschegehalt von 9 Masse-% (wf) teilweise erklären kann. Hier könnte eine Verunreinigung durch Bodenmaterial die Ursache sein.

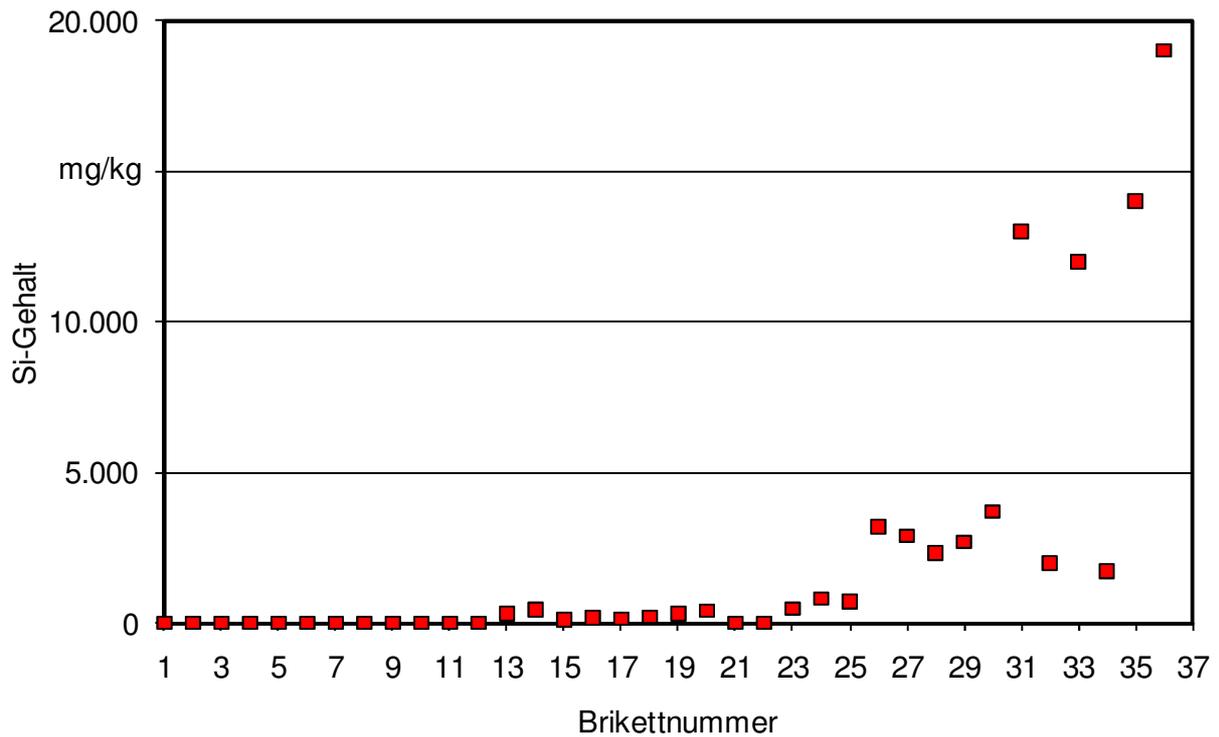


Abbildung 18: Si-Gehalt der Holzbriketts, bezogen auf die Trockenmasse

Das Braunkohlebrikett weist lediglich einen Si-Anteil von 120 mg/kg (wf) auf und liegt damit auf einem Niveau, das mit den meisten aschearmen Holzbriketts vergleichbar ist.

## 7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Im Rahmen der Charakterisierung von Briketts wurden 36 Holzbrikettproben und ein Braunkohlebrikett von verschiedenen allgemein zugänglichen Verkaufsstellen nach dem Zufallsprinzip beschafft. Hierbei handelte es sich um Briketts unterschiedlicher Holzarten und Formen, sie waren quaderähnlich oder hatten runde bzw. vier-, sechs- oder achteckige Querschnittsformen, teilweise auch mit Loch in der Mitte. Die Proben wurden hinsichtlich ihrer brennstofftechnischen, physikalischen und stofflichen Eigenschaften untersucht. Die ermittelten Ergebnisse wurden mit der deutschen Norm bzw. dem europäischen Normentwurf für Holzbriketts verglichen.

Holzbriketts unterscheiden sich nicht nur in ihrer Form und Farbe, sondern es kommt auch zu wesentlichen Schwankungsbreiten bei den wertbestimmenden Eigenschaften. Große Unterschiede sind vor allem beim Aschegehalt festzustellen. Naturbelassenes Holz besteht meist zu weniger als einem Prozent aus Asche, wohingegen das hier durchgeführte Brikettscreening Werte bis 9 % Asche in der Trockenmasse zeigt. Elf von 36 Holzbrikettproben würden nicht einmal die weniger strengen Aschegehaltsanforderung (max. 1,5 %) der Klasse A2 gemäß europäischer Norm FprEN 14 961-3 (Schluss-Entwurf) erfüllen.

Die Anforderungen an den Wassergehalt wurden von allen Holzbriketts erfüllt. Um dies aber auch nach dem Einkauf zu gewährleisten, sollten die Briketts in einem trockenen Raum bzw. in einer Schutzfolie gelagert werden.

Der Heizwert erreicht meist den für Holzbrennstoffe typischen Wert und beträgt durchschnittlich 18.760 kJ/kg (wf). Bei der Schwankungsbreite von ca. 17.580 bis 20.220 kJ/kg (wf) ist eine leichte Abhängigkeit vom Aschegehalt erkennbar.

Die Teilchendichte (Rohdichte) fällt teilweise geringer aus als in den Normen vorgegeben, sie unterschreitet in elf Fällen den geforderten Wert von 1 kg/dm<sup>3</sup>. Das gilt jedoch nur bei den quaderförmigen Briketts („Ruf“-Typ). Eine Wirkung der Teilchendichte auf die mechanische Festigkeit ließ sich nicht feststellen. Für diese Abriebfestigkeit wurde ein europäisches Prüfverfahren, jedoch noch keine Normanforderung festgelegt. Der gemessene Wert der Abriebfestigkeit beträgt durchschnittlich 97,9 %.

Bei den Hauptkomponenten Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff treten nur geringfügige Schwankungen auf. Größere Unterschiede sind beim Kalziumgehalt festzustellen, er nimmt mit dem Aschegehalt zu. Der Vorteil eines höheren Kalziumanteils in der Asche liegt in der Erhöhung des Ascheschmelzpunktes.

Bei den Spurenelementen Stickstoff, Schwefel und Chlor wurde der strengere europäische Grenzwert der Klasse A1 nur in Einzelfällen überschritten, und zwar bei Stickstoff dreimal, Chlor einmal und Schwefel einmal (bezogen auf die Grenzwerte gemäß FprEN 14961-3). Häufiger war dies jedoch bei den Schwermetallen der Fall, vor allem beim Chrom (bei 8 von 36 Holzbriketts). Daran anschließend folgen Nickel mit fünf, Kupfer mit drei und Zink mit zwei Überschreitungen. Jeweils eine Probe konnte die Begren-

zung für Arsen und Cadmium nicht einhalten. Keinerlei Auffälligkeiten konnten für Quecksilber und Blei festgestellt werden.

Die Untersuchungen zeigen, dass der Aschegehalt der kritischste Parameter bei der Feststellung der Normkonformität ist. Das bedeutet, dass bei der Rohstoffauswahl und Qualitätsüberwachung größere Anstrengungen notwendig sind, um die gegebenen Aschegehaltsanforderungen einzuhalten. Auch die beobachteten Überschreitungen bei den Schwermetallbegrenzungen in 12 Brikettproben legen den Schluss nahe, dass bei der Rohstoffauswahl und -herkunft in einigen Fällen auch Verunreinigungen durch nicht-naturbelassene Rohstoffe in Kauf genommen wurden.

Insgesamt ist eine überraschend hohe Anzahl von Überschreitungen der Normanforderung festzustellen: 19 Holzbriketts müssten allein aufgrund der Kombination von Teilchendichte- und Aschegehaltsanforderung beanstandet werden. Allerdings war die Normenkonformität hier beim Verkauf in den wenigsten Fällen (6 von 36 Brikettsorten) deklariert worden, so dass nur eine Konformitätsverletzung vorliegt. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Verwendung von Holzbriketts in nicht-genehmigungspflichtigen Kleinf Feuerungen gemäß 1. Bundesimmissionsschutzverordnung nur mit normgerechter Brikettqualität erfolgen darf (hier DIN 51 731). Somit dürften die beanstandungswürdigen Holzbriketts auch nur in genehmigungspflichtigen Anlagen, d. h. ab 1.000 kW Nennwärmeleistung, eingesetzt werden. Hiervon ist in der Praxis jedoch nicht auszugehen.

## 8 Quellenverzeichnis

- [1] BRUNNER, T. (2006): Aerosols and coarse fly ashes in fixed-bed biomass combustion: formation, characterisation and emissions. Dissertation. Eindhoven: Technische Universiteit, 158 Seiten, ISBN 3-9501980-3-2
- [2] COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION (CEN) (2004): prCEN/TS 15 104 : Feste Biobrennstoffe - Verfahren zur Bestimmung des Gehaltes an Gesamtkohlenstoff, Wasserstoff und Stickstoff - Instrumentelle Verfahren, Schluss-Entwurf, November 2004. Brüssel: CEN, 10 Seiten
- [3] COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION (CEN) (2005): CEN/TS 15 150 : Feste Biobrennstoffe - Verfahren zur Bestimmung der Teilchendichte, Datum: 2005-08. Brüssel: CEN, 13 Seiten
- [4] COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION (CEN) (2005): CEN/TS 15 210-2 : Feste Biobrennstoffe - Verfahren zur Bestimmung der mechanischen Festigkeit von Pellets und Presslingen – Teil 2: Presslinge, NMP 582 N 0318, Datum: 2005-12. Brüssel: CEN, 8 Seiten
- [5] COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION (CEN) (2005): prCEN/TS 15 289: Feste Biobrennstoffe - Bestimmung des Gesamtgehaltes an Schwefel und Chlor, Schluss-Entwurf, Datum: Juli 2005. Brüssel: CEN, 12 Seiten
- [6] COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION (CEN) (2005): prCEN/TS 15 290: Feste Biobrennstoffe - Bestimmung von Hauptbestandteilen, Schluss-Entwurf: Datum: Juli 2005. Brüssel: CEN, 10 Seiten
- [7] COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION (CEN) (2010): FprEN 14 961-3 (Final Draft, Date: June 2010): Solid biofuels – Fuel specifications and classes – Part 3: Wood briquettes for non-industrial use. Brussels: CEN, 10 Seiten, noch nicht veröffentlicht
- [8] COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION (CEN) FprEN 14 961-2: Solid biofuels - Fuel specifications and classes - Part 2: Wood pellets for non-industrial use, Final Draft, Date: June 2010. Brüssel: CEN, 10 Seiten
- [9] DEUTSCHER ENERGIEHOLZ- UND PELLET-VERBAND E. V.(2010): Pressemitteilung: Holzbriketts eine beliebte Alternative zum Beifeuern in Holzheizungen, 14.10.2010. Berlin: 2 Seiten
- [10] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (1996): DIN 51 731: Prüfung fester Brennstoffe - Presslinge aus naturbelassenem Holz - Anforderungen und Prüfung, Oktober 1996. Berlin: Beuth, 4 Seiten
- [11] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (2000): DIN 51 900-1: Bestimmung des Brennwertes mit dem Bomben-Kalorimeter und Berechnung des Heizwertes, Prüfung fester und flüssiger Brennstoffe - Teil 1: Allgemeine Angaben, Grundgeräte, Grundverfahren, April 2000. Berlin: Beuth, 20 Seiten
- [12] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (2004): DIN CEN/TS 14 774-2: Feste Biobrennstoffe - Verfahren zur Bestimmung des Wassergehaltes - Verfahren der Ofentrocknung - Teil 2: Gehalt an Gesamtwasser - Vereinfachtes Verfahren, Vornorm, November 2004, Deutsche Fassung. Berlin: Beuth, 8 Seiten

- [13] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (2004): DIN CEN/TS 14 775: Feste Biobrennstoffe - Verfahren zur Bestimmung des Aschegehaltes, Vornorm, November 2004, Deutsche Fassung. Berlin: Beuth, 10 Seiten
- [14] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (2006): DIN CEN/TS 15 297: Feste Biobrennstoffe - Bestimmung von Nebenbestandteilen. Berlin: Beuth, 10 Seiten
- [15] FRANDSEN, F.J. ; LITH, S. C. van; KORBEE, R.; YRJAS, P.; BACKMAN, R.; OBERNBERGER, I.; BRUNNER, T.; JÖLLER, M. (2007): Quantification of the release of inorganic elements from biofuels. Fuel Processing Technology, Jg. 88, S. 1118-1128
- [16] KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H.; HOFBAUER, H. (2009): Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren. 2., neu bearb. u. erw. Aufl., Berlin: Springer, 1032 Seiten, ISBN 978-3-540-85094-6
- [17] LI, Y.; LIU, H. (2000): High-pressure densification of wood residues to form an upgraded fuel. Biomass and Bioenergy, Jg. 19, Nr. 3, S. 177-186
- [18] NDIEMA, C. K. W.; MANGA, P. N.; RUTTOH, C. R. (2002): Influence of die pressure on relaxation characteristics of briquetted biomass. Energy Conversion and Management, Jg. 43, Nr. 16, S. 2157-2161
- [19] OBERNBERGER, I.; BRUNNER, T.; BÄRNTHALER, G. (2006): Chemical properties of solid fuels - significance and impact. Biomass and Bioenergy, Jg. 30, Nr. 11, S. 973-982
- [20] OBERNBERGER, I.; THEK, G. (2004): Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour. Biomass and Bioenergy, Jg. 27, Nr. 6, S. 653-669
- [21] ÖSTERREICHISCHES NORMUNGSINSTITUT (2000): ÖNORM M 7135 : Presslinge aus naturbelassenem Holz oder naturbelassener Rinde: Pellets und Briketts - Anforderungen und Prüfbestimmungen, Ausgabe 2000-11-01. Wien: ÖN, 10 Seiten
- [22] RABIER, F.; TEMMERMAN, M.; BÖHM, T.; HARTMANN, H.; JENSEN, P. D.; RATHBAUER, J.; CARRASCO, J.; FERNANDEZ, M. (2006): Particle density determination of pellets and briquettes. Biomass and Bioenergy, Jg. 30, Nr. 11, S. 954-963
- [23] TEMMERMAN, M.; RABIER, F.; JENSEN, P. D.; HARTMANN, H.; BÖHM, T. (2006): Comparative study of durability test methods for pellets and briquettes. Biomass and Bioenergy, Jg. 30, Nr. 11, S. 964-972

## 9 Anhang

Tabelle 2: Einzelwerte des Holzbrikettscreenings – Aschegehalt, Wassergehalt, Heizwert, Abriebfestigkeit und Dichte aus Auftriebsmessung (Dichte 1) und stereometrischer Bestimmung (Dichte 2)

Nr.	Aschegehalt [Masse-%]	Wassergehalt [Masse-%]	Heizwert [kJ/kg (wf)]	Abriebfestig- keit [%]	Dichte 1 [g/cm <sup>3</sup> ]	Dichte 2 [g/cm <sup>3</sup> ]
1	0,19	5,99	18.394	99,4	1,024	1,004
2	0,21	7,39	19.327	98,0	1,125	1,040
3	0,27	6,72	19.011	99,0	1,182	1,127
4	0,27	6,26	19.697	97,1	0,949	0,910
5	0,28	5,71	18.904	96,9	1,064	0,997
6	0,29	6,38	20.017	99,0	0,942	0,880
7	0,29	5,51	18.393	99,5	1,262	1,231
8	0,30	6,43	19.114	97,9	1,144	1,098
9	0,31	5,85	19.026	96,2	1,068	1,001
10	0,33	5,66	18.293	98,9	0,968	0,964
11	0,41	4,33	18.635	99,7	1,206	1,017
12	0,45	6,73	18.556	98,8	0,963	0,958
13	0,48	9,24	18.976	96,1	0,936	0,889
14	0,54	4,90	20.221	97,6	1,084	1,062
15	0,56	6,09	18.432	99,3	1,067	1,038
16	0,56	8,36	18.203	98,4	1,027	0,958
17	0,57	6,23	18.507	98,5	1,060	1,025
18	0,58	5,67	18.412	98,6	1,147	1,105
19	0,61	6,08	18.386	99,5	1,168	1,060
20	0,62	3,43	19.449	98,9	1,245	0,917
21	0,63	5,13	18.349	98,4	1,154	0,957
22	0,64	6,52	18.304	98,5	1,066	1,002
23	0,69	5,79	19.123	99,3	0,983	0,966
24	0,79	6,70	19.177	99,2	0,935	0,887
25	0,89	8,60	19.416	97,9	1,025	0,900
26	1,54	7,50	18.739	97,0	1,136	1,062
27	1,62	6,92	18.958	98,6	0,941	0,950
28	1,76	8,08	18.965	95,6	1,057	0,976
29	2,29	9,68	18.725	90,6	1,069	0,906
30	2,42	4,81	18.301	97,8	1,239	1,183
31	3,55	5,56	18.293	98,5	0,973	0,934
32	4,08	8,03	18.741	94,7	0,995	0,926
33	4,67	9,60	18.519	97,9	1,150	1,099
34	6,49	5,30	18.171	96,0	0,863	0,797
35	8,43	11,03	18.165	99,1	1,196	1,039
36	8,99	3,93	17.582	98,9	1,326	1,215
37	4,23	13,00	24.921	97,2	1,270	1,270

*Tabelle 3: Einzelwerte des Holzbrikettscreenings – Gehalt an H, C, N, O, S und Cl sowie Ca, Mg, K und Si, jeweils bezogen auf die Trockenmasse*

Nr.	H	C	N	O	S	Cl	Ca	Mg	K	Si
	[Masse-%]						[mg/kg]			
1	5,7	50,5	< 0,05	43,70	0,01	< 0,005	280	49	550	< 50
2	6,1	51,0	< 0,05	42,78	< 0,01	0,005	840	120	280	< 50
3	6,0	50,9	< 0,05	42,99	< 0,01	< 0,005	670	130	310	< 50
4	6,1	52,2	< 0,05	41,59	< 0,01	< 0,005	690	140	290	< 50
5	6,1	50,5	0,20	43,08	< 0,01	< 0,005	810	110	320	< 50
6	6,1	52,0	< 0,05	41,77	< 0,01	< 0,005	760	180	340	< 50
7	5,7	50,2	< 0,05	43,97	0,01	< 0,005	480	46	690	< 50
8	6,0	50,6	0,21	43,06	< 0,01	0,011	860	120	330	< 50
9	6,0	50,8	< 0,05	43,06	0,01	0,006	780	150	400	< 50
10	5,8	49,9	0,22	43,93	0,01	0,006	600	59	710	< 50
11	5,8	50,2	< 0,05	43,80	0,01	< 0,005	920	97	840	< 50
12	5,8	50,1	< 0,05	43,93	0,01	0,009	840	100	670	< 50
13	6,0	50,4	< 0,05	43,40	< 0,01	< 0,005	1.000	190	550	290
14	6,2	52,3	< 0,05	41,20	0,09	< 0,005	1.300	150	240	460
15	5,8	49,5	< 0,05	44,47	0,01	< 0,005	1.000	220	930	85
16	5,8	49,1	0,45	44,39	0,01	0,007	860	260	1.200	170
17	5,8	50,1	0,18	43,62	0,01	< 0,005	1.600	270	860	140
18	5,9	49,4	< 0,05	44,40	0,01	< 0,005	950	300	1.400	210
19	6,0	49,7	< 0,05	44,01	0,01	< 0,005	880	270	1.300	320
20	5,8	52,3	0,09	41,54	0,01	0,011	1.500	290	410	400
21	5,9	49,7	0,08	44,01	0,01	< 0,005	1.200	330	1.500	< 50
22	5,9	49,6	< 0,05	44,21	0,01	< 0,005	1.100	330	1.400	< 50
23	6,0	50,9	0,09	42,70	0,01	< 0,005	1.500	200	840	480
24	6,0	50,8	< 0,05	42,96	0,01	< 0,005	1.000	130	390	820
25	5,8	50,9	0,17	42,73	0,02	0,026	2.000	400	740	690
26	5,8	50,2	< 0,05	43,28	0,01	< 0,005	1.300	1.700	860	3.200
27	6,0	50,1	< 0,05	43,28	0,01	< 0,005	2.200	250	750	2.900
28	5,8	50,1	< 0,05	43,45	0,01	< 0,005	2.700	440	920	2.300
29	5,8	49,8	< 0,05	43,50	0,01	< 0,005	4.300	920	950	2.700
30	5,6	49,3	0,17	43,98	0,02	< 0,005	4.100	310	1.200	3.700
31	5,8	48,1	< 0,05	44,56	< 0,01	< 0,005	1.400	230	820	13.000
32	5,5	50,5	0,36	42,00	0,03	0,023	13.000	850	230	2.000
33	5,7	48,7	0,08	43,94	0,02	0,007	2.000	280	1.300	12.000
34	5,7	48,1	0,07	45,56	0,01	< 0,005	2.300	320	1.300	1.700
35	5,2	49,2	0,44	41,78	0,04	0,012	16.000	1.100	2.300	14.000
36	5,4	46,8	0,13	45,22	0,01	< 0,005	3.300	410	1.700	19.000
37	4,7	65,3	0,74	27,53	0,30	0,027	10.000	3.900	240	120

Tabelle 4: Einzelwerte des Holzbrikettscreenings – Schwermetallgehalte: Na, As, Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Hg und Zn, jeweils bezogen auf die Trockenmasse

Nr.	Na	As	Pb	Cd	Cr	Cu	Ni	Hg	Zn
	[mg/kg]								
1	11	< 0,8	< 1	< 0,2	< 1	3	< 1	< 0,07	2
2	< 10	< 0,8	< 1	< 0,2	1	3	2	< 0,07	11
3	< 10	< 0,8	< 1	< 0,2	< 1	1	< 1	< 0,07	9
4	< 10	< 0,8	< 1	0,4	< 1	< 1	< 1	< 0,07	9
5	< 10	< 0,8	< 1	< 0,2	< 1	1	< 1	< 0,07	11
6	13	< 0,8	< 1	< 0,2	< 1	< 1	< 1	< 0,07	5
7	< 10	< 0,8	< 1	< 0,2	< 1	2	3	< 0,07	2
8	< 10	< 0,8	< 1	< 0,2	< 1	< 1	< 1	< 0,07	12
9	39	< 0,8	< 1	< 0,2	< 1	2	1	< 0,07	14
10	110	< 0,8	< 1	< 0,2	2	1	1	< 0,07	4
11	16	< 0,8	< 1	< 0,2	1	2	1	< 0,07	2
12	99	< 0,8	< 1	< 0,2	< 1	< 1	< 1	< 0,07	4
13	29	< 0,8	< 1	< 0,2	2	< 1	1	< 0,07	12
14	48	< 0,8	< 1	< 0,2	< 1	2	< 1	< 0,07	8
15	< 10	< 0,8	< 1	< 0,2	< 1	< 1	< 1	< 0,07	4
16	15	< 0,8	< 1	< 0,2	< 1	< 1	1	< 0,07	5
17	17	< 0,8	< 1	< 0,2	< 1	1	< 1	< 0,07	6
18	< 10	< 0,8	< 1	< 0,2	1	1	< 1	< 0,07	3
19	14	< 0,8	< 1	< 0,2	3	1	1	< 0,07	5
20	68	< 0,8	3	< 0,2	4	1	1	< 0,07	7
21	< 10	< 0,8	3	0,5	< 1	2	< 1	< 0,07	1.100
22	< 10	< 0,8	< 1	< 0,2	1	< 1	2	< 0,07	5
23	33	< 0,8	< 1	< 0,2	3	< 1	< 1	< 0,07	29
24	25	< 0,8	1	0,6	5	2	4	< 0,07	20
25	110	1,3	< 1	< 0,2	5	2	< 1	< 0,07	11
26	76	< 0,8	< 1	< 0,2	16	2	8	< 0,07	8
27	52	< 0,8	2	0,5	7	2	4	< 0,07	26
28	53	< 0,8	< 1	< 0,2	9	2	3	< 0,07	15
29	61	< 0,8	1	< 0,2	12	2	7	< 0,07	13
30	150	< 0,8	1	< 0,2	15	3	8	< 0,07	16
31	280	< 0,8	1	< 0,2	33	2	14	< 0,07	13
32	87	< 0,8	< 1	0,4	7	3	7	< 0,07	130
33	150	< 0,8	1	0,3	26	3	13	< 0,07	10
34	380	< 0,8	1	< 0,2	77	6	34	< 0,07	17
35	280	< 0,8	3	0,5	48	7	27	< 0,07	97
36	390	< 0,8	3	0,3	60	8	27	< 0,07	18
37	2.000	< 0,8	< 1	< 0,2	4	< 1	< 1	< 0,07	3



## Berichte im Rahmen dieser Schriftenreihe

Berichte aus dem TFZ:

1	Qualitätssicherung bei der dezentralen Pflanzenölerzeugung für den Nicht-Nahrungsbereich 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 Holzzentralheizungsanlagen 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	Wärmegewinnung 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 Technologische Untersuchungen und Erarbeitung von Qualitätssicherungsmaßnahmen
13	Getreidekörner als Brennstoff für Kleinf Feuerungen - Technische Möglichkeiten und Umwelteffekte –
14	Mutagenität der Partikelemissionen eines mit Rapsöl- und Dieselmotoren 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 Kleinf Feuerungen für Holz und Ansätze für Minderungsmaßnahmen
23	Bewertung kostengünstiger Staubabscheider für Einzelfeuerstätten und Zentralheizungskessel
24	Charakterisierung von Holzbriketts



