

Harald Philipp Gerhards

Schriftenreihe zur  
Aufbereitung und Veredlung

76

Entwicklung von Verfahren zur Produktion und  
dezentralen thermischen Nutzung hochwertiger  
Festbrennstoffe aus biogenen Reststoffen und  
Energiegräsern

Herausgeber:  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Pretz  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Quicker  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hermann Wotruba

**RWTHAACHEN**

„Entwicklung von Verfahren zur Produktion und dezentralen thermischen Nutzung  
hochwertiger Festbrennstoffe aus biogenen Reststoffen und Energiegräsern“

Der Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik  
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktors der Ingenieurwissenschaften

genehmigte Dissertation  
vorgelegt von **Dipl.-Chem.**

**Harald Philipp Gerhards**

aus Köln

**Berichter:** Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Quicker  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Herbert Pfeifer

Tag der mündlichen Prüfung: 12. September 2019



Schriftenreihe zur Aufbereitung und Veredlung

herausgegeben von

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Pretz  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Quicker  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hermann Wotruba

Band 76

**Harald Philipp Gerhards**

**Entwicklung von Verfahren zur Produktion und  
dezentralen thermischen Nutzung hochwertiger  
Festbrennstoffe aus biogenen Reststoffen  
und Energiegräsern**

Shaker Verlag  
Düren 2020

## **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

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

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2019)

Lehrstuhl für Aufbereitung und Recycling fester Abfallstoffe  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Pretz  
Wüllnerstraße 2  
D - 52056 Aachen  
Tel. +49(0)241 - 80-95700, Fax +49(0)241 - 8092232  
E-Mail: [lehrstuhl@ifa.rwth-aachen.de](mailto:lehrstuhl@ifa.rwth-aachen.de)

Lehr- und Forschungsgebiet Technologie der Energierohstoffe  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Quicker  
Wüllnerstraße 2  
D - 52056 Aachen  
Tel. +49(0)241 - 80-95705, Fax +49(0)241 - 8092624  
E-Mail: [info@teer.rwth-aachen.de](mailto:info@teer.rwth-aachen.de)

Lehr- und Forschungsgebiet Aufbereitung mineralischer Rohstoffe  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hermann Wotruba  
Lochnerstraße 4 - 20  
D - 52056 Aachen  
Tel. +49(0)241 - 80-97246, Fax +49(0)241 - 8092635  
E-Mail: [amr@amr.rwth-aachen.de](mailto:amr@amr.rwth-aachen.de)

Copyright Shaker Verlag 2020

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7371-3  
ISSN 1617-6545

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren  
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9  
Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

---

## Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde am Lehr- und Forschungsgebiet „Technologie der Energierohstoffe“ an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule in Aachen erstellt.

Mein Dank gilt:

meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Quicker für die große Freiheit bei der Ausgestaltung des Themas und Prof. Dr.-Ing. Herbert Pfeifer für die Übernahme des Koreferats,

meinen Projektpartnern vom Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik (UMSICHT) am Institutsteil Sulzbach-Rosenberg für die Unterstützung meiner Forschung und die gute Zusammenarbeit im Rahmen unseres Forschungsprojekts, besonders Herrn Steffen Lippmann, Herrn Dipl.-Wirt.-Ing. Fabian Stenzel und Herrn Dipl.-Ing. (FH) Johannes Neumann (M. Sc.),

Herrn Dipl.-Inform. Thomas Finken von APFinken für die Unterstützung bei der Erweiterung der Steuerungselektronik und die Programmierung der Anlagenautomatisierung,

Frau Cornelia Friedländer, die mir den Start in Aachen sehr erleichtert hat,

Herrn David Friedländer (M. Sc.) für die langjährige gute und vertrauensvolle Zusammenarbeit während seiner Projekt-, Bachelor- und Masterarbeit, als Hilfswissenschaftler und dann auch als Projektpartner bei Spanner Re<sup>2</sup>,

Herrn Dr.-Ing. Andrej Stanev und der Fachagentur „Nachwachsende Rohstoffe“ für die Begleitung und Unterstützung meiner Forschung,

dem Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) für die Finanzierung meines Forschungsprojekts,

der Firma Amandus Kahl für die Unterstützung bei der ökonomischen Betrachtung des Herstellungsprozesses,

Herrn Eckhard Strothmann für die Unterstützung bei der Brennstoffherstellung,

meiner Frau Ulrike für ihre Unterstützung bei der Ausfertigung der Dissertation,

meinen Bürokollegen Herrn Dr.-Ing. Florian Neuerburg und Herrn Pawel Baran (M. Eng.) für die gute Zusammenarbeit und gute Atmosphäre in Stube 126,

dem Team des TEER, das meine Forschung und mein Projekt mitgetragen hat, und den Studenten der RWTH, die durch Ihre Studien-, Projekt- und Abschlussarbeiten zu meiner Forschung beigetragen haben.

## **Hinweis zu Veröffentlichungen**

Teile der Ergebnisse dieser Dissertation wurden vom Autor schon in folgenden Publikationen veröffentlicht:

H. Gerhards, J. Neumann, P. Quicker

Brennstoffpresslinge aus alternativen Biomasserohstoffen zum Einsatz in Kleinf Feuerungsanlagen. Schlussbericht für die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Aachen, November 2014

H. Gerhards, J. Neumann, P. Quicker

Hochwertige Festbrennstoffe aus Reststoffen der Landwirtschaft, Kommunalbetrieben, Futter- und Lebensmittelindustrie. In: 4. Wissenschaftskongress Abfall- und Ressourcenwirtschaft, DGAW (Hrsg.), Abfall- und Ressourcenwirtschaft, Berlin, 2014, S. 37-40

K. Weber, H. Gerhards, P. Quicker

Beeinflussung des Ascheschmelzverhaltens biogener Reststoffe durch Laugung und Additivierung. In: 3. Wissenschaftskongress Abfall- und Ressourcenwirtschaft, DGAW (Hrsg.), Abfall aktuell, Stuttgart, 2013, S. 157-161

H. Gerhards, S. Seabra, P. Quicker

Tailor-Made Solid Fuels from Alternative Biomass - Thermal and Chemical Upgrading of Non-Woody Biomass. In: Proceedings of the 20th European Biomass Conference and Exhibition, Mailand, 2012, S. 1508-1514

H. Gerhards, G. Peña, P. Quicker

Brennstoffkonfektionierung - Stoffliche und energetische Biomassenutzung. IFAT 2012 Weltmesse für Wasser-, Abwasser-, Abfall- und Rohstoffwirtschaft, München, 7.-8. Mai 2012

## Hinweis zur Mitwirkung von Studenten

Die vorliegende Arbeit basiert in Teilen auf den folgenden von Harald Gerhards betreuten nicht veröffentlichten studentischen Arbeiten:

Student	Titel
Lara Bender	Brennstoffgewinnung aus alternativen Biomassen - Verbesserung der Brennstoffeigenschaften durch Additivierung
Sebastian Bergs	Konzeptionierung und Planung einer Technikumsanlage zur Biomasselaugung
Christoph Büschgens	Brennstoffe aus Biomasseressourcen - Agglomerationsverhalten von Biomasse
	Brennstoffe aus Biomasseressourcen - Brennstoffkonfektionierung von Biomasse
Britta Eichentopf	Experimentelle Untersuchungen der technischen Möglichkeiten zur Verringerung des Aschegehalts problematischer Biomassen durch Laugung mit Wasser
David Friedländer	Verfahrenstechnische Anpassung eines Feuerungsprototyps und Erstellung eines Regelschemas für die Verbrennung von alternativen Biomassebrennstoffen
Marco Haus	Verbesserung des Ascheschmelzverhaltens von Brennstoffen aus alternativen Biomassen durch Zugabe von calcium-, magnesium- und aluminiumhaltigen Additiven
Matyas Juhasz	Variation von Betriebsparametern zur Optimierung einer Biomasselaugung und Erstellung einer Analyseverfahren für Laugungsabwässer
Jan Jütten	Laugung von Grünschnitt, Heu und Gras zur Verbesserung der Brennstoffeigenschaften
Felix Knicker	Potentiale biogener Reststoffe und Nebenprodukte zur Erzeugung von Brennstoffen gemäß 1. BImSchV
Philipp Mend	Laugung von Miscanthus und Mühlennebenprodukten zur Verbesserung der Brennstoffeigenschaften
René Schwermer	Verbesserung des Ascheschmelzverhaltens von alternativen Biomassebrennstoffen durch Zugabe von Additiven
Sebastian Solbach	Brennstoffpellets aus Miscanthus – Optimierung durch den Einsatz von Additiven
Matthias Stickel	Optimierung, Bilanzierung und Automatisierung eines Feuerungsprototypen für Biomasse
Felix Weiler	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung eines Aufbereitungsprozesses für alternative Biomassebrennstoffe und Entwicklung eines Contracting-Modells
Christian Wilke	Mechanische Aufbereitung von alternativen Biomasserohstoffen zur thermischen Nutzung in Kleinfeuerungsanlagen

## Zusammenfassung

Ziel dieser Dissertation ist ein ökonomisch umsetzbares Konzept zur Produktion hochwertiger Festbrennstoffe aus alternativen Biomasserohstoffen sowie die Anpassung der Wirbelfeuerungstechnik an die Nutzung als Kleinf Feuerungsanlage und Heizaggregat für diese Brennstoffe. Als Beispiele für die verschiedenen Biomassearten wurden Grasschnitt, Heu, Grünschnitt, Miscanthus und Mühlennebenprodukte ausgewählt. Es wurden die Rohstoffpotentiale und rechtlichen Rahmenbedingungen für die Aufbereitung und energetische Nutzung dieser Stoffe ermittelt. Aufbauend auf der aktuellen Fachliteratur wurde ein Verfahrensablauf für die Aufbereitung für verschiedene alternative Biomassen entwickelt. Mit Versuchen zum Zerkleinerungs-, Laugungs- und Agglomerationsverhalten wurden die Parameter der einzelnen Prozessschritte bestimmt. Das Ascheschmelzverhalten der Brennstoffe und die Verbesserung durch Zugabe mineralischer Zuschlagstoffe (Additivierung) wurde untersucht.

Die Eignung von Einwellenzerkleinerern und Schneidmühlen für die Zerkleinerung der Rohstoffe wurde gezeigt. Durch eine Extraktion mit Wasser (Biomassewäsche / Biomasselaugung) konnte sowohl bei Halmgut (Heu) und Energiegräsern (Miscanthus) als auch bei holzartigen Materialien (Grünschnitt) eine signifikante Absenkung der Aschegehalte und Chlorgehalte (um bis zu 95 %) festgestellt werden. Eine starke Extraktion von Alkali- und Erdalkalimetallen, Aluminium, Chloriden, Phosphaten und Sulfaten wurde nachgewiesen. Bei Mühlennebenprodukten war die Wirkung der Laugung hingegen gering. Brikettversuche zeigten, dass die Extraktion von Mineralstoffen und wasserlöslichen organischen Verbindungen eine erhebliche Verschlechterung der Festigkeit bewirkt. Pelletversuche zeigten, dass der Einsatz von Stärke als Bindemittel notwendig ist, um stabile Pellets aus den gelaugten Biomassen herzustellen. Nur Mühlennebenprodukte waren ohne Bindemittel pelletierbar.

Auf den Ergebnissen aufbauend wurde der Konfektionierungsprozess, der eine einstufige Zerkleinerung, eine mindestens zehnminütige Biomasselaugung mit anschließender kurzer Spülung, eine Trocknung sowie die Zugabe von 5 % Kalkhydrat und Stärke beinhaltet, in Versuchsreihen im Gramm-, Kilogramm- und Tonnenmaßstab getestet. Abschließend wurde ein Konzept zur wirtschaftlichen Nutzung erstellt und bewertet. Es wurde aufgezeigt, dass nur bei hohen jährlichen Durchsätzen Produktionskosten unterhalb des Niveaus aktueller Holzpelletpreise erreicht werden können. Entsprechend sollte die Brennstoffproduktion in größeren zentralen Einheiten ablaufen. Die Nutzung von Nahwärme (Kraftwerk, Biogasanlage, Industriebetrieb) kann stark zur Wirtschaftlichkeit beitragen.

Zur thermischen Nutzung der Brennstoffe wurde auf Grundlage der Wirbelfeuerungstechnik ein für die Brennstoffe geeignetes Heizaggregat gebaut und optimiert. Dazu wurde der Zündungsvorgang automatisiert, die Brennkammer mit einem Wassermantel ausgestattet und die Geometrie der Nachbrennkammer geändert. Nach weiteren Optimierungen konnten in diesem neuen Prototyp alle konfektionierten Brennstoffe ohne Verschlackungen verbrannt werden. Konstruktionsbedingt konnte bei Heu und Gras keine gestufte Verbrennung zur Stickoxidreduktion aufrechterhalten werden. Dennoch konnten durch die Rezirkulation von Rauchgas die NO<sub>x</sub>-Emissionen stark abgesenkt werden. Bei allen getesteten Brennstoffen konnten die Grenzwerte der 1. BImSchV [181] für gasförmige

---

Emissionen eingehalten werden. Die Staubemissionen konnten im Vergleich zum ersten Prototyp der Wirbelfeuerung stark gesenkt werden. Dennoch sind die Staubemissionen zu hoch, um ohne nachträgliche Feinstaubabscheidung die gesetzlichen Kriterien einzuhalten. Weiter konnte gezeigt werden, dass der Verbrennungsprozess in der Wirbelfeuerung automatisierbar ist. Dabei erwiesen sich der automatisierte Anfahrvorgang und der ungestufte Betrieb als sehr sicher und zuverlässig. Der gestufte Betrieb ist ebenfalls vollständig automatisiert durchführbar. Die Rauchgasemissionen der Feuerung konnten durch die Automatisierung weiter gesenkt werden. Vergleichsversuche mit einer Muldenfeuerung und einer Rostfeuerung zeigten, dass eine Verbrennung der konfektionierten Brennstoffe in einer wassergekühlten Muldenfeuerung möglich ist, aber nicht alle Grenzwerte eingehalten werden. In der konventionellen Rostfeuerung war keine verschlackungsfreie Verbrennung von Heu, Gras und Mühlennebenprodukten möglich.

Das entwickelte Konzept zeigt zusammen mit dem angepassten Heizaggregat, dass unter den passenden wirtschaftlichen Bedingungen eine energetische Nutzung alternativer Biomassen möglich ist. Allerdings zeigt diese Arbeit insbesondere bei der Verbesserung des Ascheschmelzverhaltens, der Biomassetrocknung und der Feinstaubabscheidung der Wirbelfeuerung auch weiteren Forschungsbedarf auf.

## Abstract

The aim of this dissertation is an economically feasible concept for the production of high-quality solid fuels from alternative biomass as well as the adaptation of the vortex firing technique to the use as a small combustion plant and heating unit for these fuels. As examples of the different biomass types, grass cut, hay, Green cut, Miscanthus and mill by-products were selected. The raw material potential and legal engagements for the preparation and energetic use of these substances were determined. Based on the current technical literature, a process sequence for the preparation of various alternative biomass was developed. The parameters of the process steps were determined with tests for the comminution, leachable and agglomeration behaviour. The ash melting behaviour of the fuels and the improvement by adding mineral aggregates (additivation) were investigated.

The suitability of single-screw crusher and cutting mills for the crushing of the raw materials were shown. By an extraction with water (biomass washing/biomass leaching), both stalk material (hay) and energy grasses (Miscanthus) and wood-like materials (green cut) showed a significant reduction in the ash content and chlorine content (by up to 95 %). A strong extraction of alkaline and alkaline earth metals, aluminium, chlorides, phosphates and sulphates has been proved. In the case of mill-by-products the effect of the leaching was low. Briquetting tests showed that the extraction of minerals and water-soluble organic compounds has a significant deterioration in strength. Pelleting tests showed that the use of starch as a binding agent is necessary to produce stable pellets from the leached biomass. Only mill by-products were pelletizable without binder.

Based on the results, the upgrading process, which includes a single-stage crushing, a (minimum) ten-minute biomass leaching with subsequent short washing, drying as well as the addition of 5% calcium hydrate and starch, was tested in series of experiments in the gram scale, kilogram scale and ton scale. Finally, a concept for economic use was created and evaluated. It has been shown that production costs below the current wood pellet prices only can be accomplished by high annual rates. Accordingly, the fuel production should run in larger central units. The use of local heating (power station, biogas plant, industrial plant) can contribute greatly to the economy.

A heating unit suitable for the conditioned fuels was built based on the vortex firing technique and optimised. The ignition process was automated, the firing chamber was equipped with a water jacket and the geometry of the post-combustion chamber was changed. After further optimizations, all conditioned fuels could be burned without slagging in this new prototype. The post-combustion for nitrogen oxide reduction could not be maintained in the case of hay and grass. Nevertheless, the recirculation of flue gas has significantly reduced NO<sub>x</sub> emissions. For all tested fuels, the limits of the 1. BImSchV [181] for gaseous emissions could be kept. The dust emissions could be significantly reduced compared with the first prototype of the vortex firing. Nevertheless, the dust emissions are too high for complying with the legal criteria without subsequent fine dust separation. It was further shown that the combustion process in the vortex firing is automatable. The automated start up process and the ungraded combustion were very safe and reliable. The stepped combustion was fully automated, too. The flue gas emissions of the firing could be further reduced by automation. Comparison

tests with a hollow firing and a rust firing showed that a combustion of the conditioned fuels is possible in a water-cooled hollow firing, but not all limit values are adhered. Slagging free combustion of hay, grass and mill by-products was not possible in the conventional rust firing.

Together with the adapted heating unit the developed concept shows that an energetic use of alternative biomass is possible under the appropriate economic conditions. However, this work also shows a need of further research, especially in the improvement of ash melting behaviour, biomass drying and the fine dust separation of the vortex firing.

# Inhaltsverzeichnis

Danksagung .....	I
Hinweis zu Veröffentlichungen .....	II
Hinweis zur Mitwirkung von Studenten .....	III
Zusammenfassung.....	IV
Abstract .....	VI
Inhaltsverzeichnis.....	VIII
Formelzeichen und Abkürzungen .....	1
<b>1 Einleitung und Zielsetzung .....</b>	<b>4</b>
<b>2 Stand der Wissenschaft .....</b>	<b>6</b>
2.1 Definitionen .....	6
2.2 Biomassepotentiale in Deutschland .....	8
2.3 Rechtliche Rahmenbedingungen und Normen.....	9
2.4 Chemische Zusammensetzung der Biomasse .....	13
2.5 Ascheschmelzverhalten von Biomasseaschen.....	16
2.6 Brennstoffproduktion und –aufbereitung .....	18
2.7 Biomasseverbrennung .....	27
2.8 Feuerungstechnik für alternative Biomasse .....	32
2.9 Wirbelfeuerung.....	33
<b>3 Analysemethoden .....</b>	<b>36</b>
3.1 Normierte Verfahren .....	36
3.2 Nichtnormierte Verfahren .....	36
<b>4 Verfahrensauswahl und Prozessparameter .....</b>	<b>38</b>
4.1 Konzept eines Produktionsverfahren .....	38
4.2 Eingesetzte Rohstoffe .....	39
4.3 Störstoffabscheidung .....	40
4.4 Zerkleinerung .....	41
4.5 Flüssig-fest-Extraktion: Parameter.....	43

---

4.6	Flüssig-fest-Extraktion: Versuchskampagne .....	49
4.7	Additivzugabe .....	57
4.8	Agglomeration: Brikettierung .....	65
4.9	Agglomeration: Pelletierung .....	70
4.10	Fazit Verfahrensauswahl .....	73
<b>5</b>	<b>Up-Scaling und Testläufe .....</b>	<b>75</b>
5.1	Eingesetzte Rohstoffe .....	75
5.2	Zerkleinerung .....	76
5.3	Extraktion und Trocknung: Kilogrammaßstab .....	76
5.4	Extraktion und Trocknung: Tonnenmaßstab .....	82
5.5	Additivierung .....	90
5.6	Pelletierung .....	91
5.7	Fazit Testläufe .....	94
<b>6</b>	<b>Wirtschaftliche Realisierbarkeit .....</b>	<b>95</b>
6.1	Szenarien .....	95
6.2	Betrachtete Prozesskette .....	96
6.3	Kostenermittlung .....	97
6.4	Beispiele für Wirtschaftlichkeitsberechnungen .....	99
6.5	Sensitivitätsanalyse .....	102
<b>7</b>	<b>Entwicklung eines angepassten Heizungsaggregats .....</b>	<b>107</b>
7.1	Konstruktion des Prototyp 2.0 .....	107
7.2	Inbetriebnahme des Prototyps 2.0 .....	121
7.3	Erste Optimierung Prototyp 2.1 .....	134
7.4	Zweite Optimierung Prototyp 2.2 .....	146
7.5	Automatisierung und Bilanzierung Prototyp 2.2 .....	151
<b>8</b>	<b>Gesamtfazit und Ausblick .....</b>	<b>165</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>168</b>
<b>10</b>	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>180</b>

<b>11</b>	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>193</b>
<b>12</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>197</b>
12.1	Zu Kapitel 2 .....	197
12.2	Zu Kapitel 3 .....	203
12.3	Zu Kapitel 4 .....	204
12.4	Zu Kapitel 5 .....	208
12.5	Zu Kapitel 7 .....	224

## Formelzeichen und Abkürzungen

Tabelle 0.1: Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
A	Gew.-%	Aschegehalt
Al	kg/GJ	Alkali-Index, Verschlackungsneigung
C	-	Durchflusskoeffizient
$\bar{c}_p$	KJ/kg K	Mittlere spezifische Wärmekapazität
D, d	m	Durchmesser
DT	°C	Erweichungstemperatur (engl.: deformation temperature)
e	-	Regeldifferenz bzw. Regelfehler
F	N	Auflast
f	Hz	Frequenz
FT	°C	Fließtemperatur (engl.: flow temperature)
G	-	Grenzwert
H	m	Höhe
HT	°C	Halbkugeltemperatur (engl.: hemisphere temperature)
h	KJ/kg <sub>B</sub>	spezifische Enthalpie
H <sub>u</sub>	KJ/kg <sub>B</sub>	Heizwert
KP	-	Proportionalverstärkung
KS	-	(auch KPS) Verstärkung
l	m	Länge
l <sub>feucht</sub>	kg <sub>B</sub> /kg <sub>B</sub>	spezifische feuchte Verbrennungsluftmenge
l <sub>min</sub>	kg <sub>B</sub> /kg <sub>B</sub>	spezifische Mindestluftmenge
l <sub>trocken</sub>	kg <sub>B</sub> /kg <sub>B</sub>	spezifische trockene Verbrennungsluftmenge
m	kg	Masse
$\dot{m}$	kg/h	Massenstrom
n	mol	Stoffmenge
O <sub>min</sub>	kgO <sub>2</sub> /kg <sub>B</sub>	spezifischer Sauerstoffbedarf
p	Pa	Druck in Pascal
$\dot{Q}_n$	kW	Nutzwärmeleistung
q <sub>AV</sub>	KJ/kg <sub>B</sub>	spezifischer Abgasverlust
R	J/mol K	Universelle Gaskonstante
r	m	Radius
Re	-	Reynoldszahl
ST	°C	Sphärische Temperatur
SST	°C	Schrumpfungs- oder Sintertemperatur (engl.: shrinkage starting temperature)
T	°C	Temperatur
T <sub>0</sub>	°C	Umgebungstemperatur
T <sub>G</sub>	s	Ausgleichszeit
TN	s	Nachstellzeit
T <sub>U</sub>	s	Verzugszeit
T <sub>V</sub>	s	Vorhaltzeit
$\dot{V}$	m <sup>3</sup> /h	Volumenstrom
VOC	Gew.-%	Flüchtige (volatile organic compounds)
W	-	Sollwert bei Reglern
W	Gew.-%	Wassergehalt
X	-	Regler Istwert
Y	-	Reglerausgang (Stellgröße)

$\beta$	-	Durchmesserverhältnis
$\gamma_i$	kg/kg <sub>a</sub>	Massenanteil in der Elementaranalyse
$\Delta p$	Pa	Differenzdruck
$\delta$	mm	Schichtdicke
$\epsilon$	-	Expansionszahl
$\eta_F$	-	Feuerungstechnischer Wirkungsgrad
$\eta_K$	-	Kesselwirkungsgrad
$\lambda$	kg <sub>i</sub> /kg <sub>i</sub> <sup>min</sup>	Luftzahl
$\mu$	kg/kg	Massenverhältnis
$\nu$	mol/mol	Stoffmengenverhältnis
$\xi$	kg/kg	Massenanteil
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte
$\sigma_z$	MPa	Spaltzugfestigkeit
$\omega$	m/s	Geschwindigkeit

Tabelle 0.2: Abkürzungen und Indices

Abkürzung	Bedeutung
AbfRRRL	Abfallrahmenrichtlinie
af	aschefrei
AV	Abgasverlust
awf	asche- und wasserfrei
B	Brennstoff / Biomasse
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
BEE	Biomass Energy Europe
BImSchG	Bundesimmissionsschutzgesetz
BImSchV	Bundesimmissionsschutzverordnung
BioAbfV	Bioabfallverordnung
BMEI	Bundeministeriums für Ernährung und Landwirtschaft
BMU	Bundesministerium für Umwelt
BS	Brennstoffschnecke
CEN/TS	European Committee for Standardization/Technical Specifications
DBFZ	Deutsches Biomasseforschungszentrum
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EuGH	Europäischer Gerichtshof
EWZK	Einwellenzerkleinerer
FM	Frischmasse
FL	Frischluf
FNR	Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.
HBK	Hauptbrennkammer
HOAI	Honorarordnung für Architekten und Ingenieure
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
L	Luft
MNP	Mühlennebenprodukte
N <sub>2</sub> *	Luftstickstoff
NBK	Nachbrennkammer
NO <sub>x</sub>	Stickstoffoxide (NO + NO <sub>2</sub> + N <sub>2</sub> O)
Rezigas	Rezirkulationsgas
Rs	Rechtssache
SL	Sekundärluft
Slg.	Sammlung

---

SM	Schneidmühle
Smp	Schmelzpunkt
SO <sub>x</sub>	Schwefeloxide (SO <sub>2</sub> + SO <sub>3</sub> )
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
TH	Thüringen
TM	Trockenmasse
TS	Trockensubstanz
TS	Teilstrecke
tr.	trocken
UBA	Umweltbundesamt
VL	Verbrennungsluft
W	Wasser
wf	wasserfrei
waf	Wasser und Asche frei
WGBU	Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung: Globale Umweltveränderung
ZG	Zündgebläse
ZRS	Zellradschleuse

---