

Tobias Distler

**Torrefizierung von Biomasse
zur Mitverbrennung in
kohlebefeuereten Dampfkraftwerken**



Cuvillier Verlag Göttingen
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag



Torrefizierung von Biomasse zur Mitverbrennung in kohlebefeuerten Dampfkraftwerken





Torrefizierung von Biomasse zur Mitverbrennung in kohlebefeueten Dampfkraftwerken

Vom Promotionsausschuss der
Technischen Universität Hamburg-Harburg
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

Tobias Peter Distler

aus

Neustadt an der Aisch

2016



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.

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2016

Zugl.: (TU) Hamburg-Harburg, Univ., Diss., 2016

Gutachter: 1. Prof. Dr.-Ing. Alfons Kather
 2. Prof. Dr.-Ing. Martin Kaltschmitt

Datum der mündlichen Prüfung: 09. November 2016

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2016

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2016

Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier aus nachhaltiger Forstwirtschaft.

ISBN 978-3-7369-9416-4

eISBN 978-3-7369-8416-5







Danksagung

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Energietechnik der Technischen Universität Hamburg-Harburg entstanden.

Zunächst möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. A. Kather für die Aufnahme am Institut und die Möglichkeit zur Promotion bedanken. Seine hervorragende fachliche Betreuung und sein enormes persönliches Engagement haben mir die Anfertigung dieser Arbeit sehr erleichtert. Ich danke Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Kaltschmitt für die Anfertigung des Zweitgutachtens und Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Schlüter für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Den Kolleginnen und Kollegen, die mich während meiner Zeit am Institut begleitet haben, danke ich für den freundschaftlichen Umgang und die stets sehr positive Arbeitsatmosphäre. Für viele fachliche Gespräche und Diskussionen bedanke ich mich besonders bei Volker Roeder und Mathias Klostermann. Zudem bin ich für viele schöne Stunden auch nach Feierabend dankbar, ob beim Sport, am Kickertisch, in der Kneipe oder bei zahlreichen weiteren Gelegenheiten. In den vier Jahren am Institut sind viele Freundschaften entstanden, von denen ich mir auch nach meinem Ausscheiden eine lange Beständigkeit erhoffe.

Bei meinen Freunden bedanke ich mich für die nötige zwischenzeitliche Ablenkung. Meinen Eltern danke ich für den bedingungslosen Rückhalt und die fortwährende Unterstützung. Nicht zuletzt bedanke ich mich bei meiner Frau Simone für Unterstützung, Verständnis, Interesse und Ablenkung.

Hamburg, im November 2016

Tobias Distler





INHALTSVERZEICHNIS

Inhaltsverzeichnis.....	I
Nomenklatur.....	III
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation.....	2
1.2 Ziel und Abgrenzung der Arbeit.....	3
1.3 Vorgehensweise	4
2 Stand von Wissenschaft und Technik	5
2.1 Weltweite Aktivitäten	5
2.2 Mitverbrennung nicht torrefizierter Biomasse.....	7
2.3 Mitverbrennung torrefizierter Biomasse	11
3 Grundlagen der Torrefizierung von Biomasse	15
3.1 Brennstoff Biomasse.....	16
3.1.1 Makromolekularer Aufbau.....	16
3.1.2 Kurz- und Elementaranalyse.....	18
3.2 Prozess der Torrefizierung	20
3.2.1 Thermochemische Vorgänge bei der Torrefizierung	21
3.2.2 Produkte der Torrefizierung.....	23
3.2.3 Eigenschaften der festen Torrefizierungsprodukte	24
3.2.4 Sinnvolle Prozessparameter	30
3.3 Reaktortypen.....	32
4 Betrachtete Szenarien und Kennzahlen.....	35
4.1 Betrachtete Szenarien.....	35
4.2 Energetische Effizienz.....	38
5 Modellbildung	39
5.1 Kraftwerk.....	39
5.1.1 Gesamtprozess.....	40
5.1.2 Dampferzeuger	40
5.2 Mühlen	42
5.3 Trockner	46



5.4 Torrefizierungsreaktor.....	48
5.4.1 Reaktormodell	50
5.4.2 Thermochemisches Modell.....	56
5.5 Kühler.....	60
5.6 Pelletierung.....	60
5.7 Transport.....	61
5.8 Brennstoffe.....	64
5.9 Integration der Teilmodelle.....	66
5.9.1 Allgemeines.....	66
5.9.2 Integration in den Kraftwerksprozess	69
5.9.3 Eigenständige Anlagen zur Pelletproduktion	74
6 Ergebnisse.....	77
6.1 Ergebnisse der Teilmodelle	77
6.1.1 Dampfkraftwerk.....	77
6.1.2 Torrefizierungsreaktor.....	84
6.2 Vorbehandlung in Einzelanlagen.....	87
6.3 Vorbehandlung integriert in den Kraftwerksprozess	89
6.3.1 Dampfbeheizte Torrefizierung	90
6.3.2 Rauchgasbeheizte Torrefizierung	96
6.3.3 Auswirkungen der einzelnen Prozessschritte.....	100
6.4 Energetische Effizienz.....	101
6.5 CO ₂ -Bilanz.....	103
6.5.1 CO ₂ -Bilanz der untersuchten Brennstoffe.....	103
6.5.2 CO ₂ -Bilanz der untersuchten Varianten	106
6.6 Abschließende Bewertung	107
7 Zusammenfassung	111
Literaturverzeichnis.....	115
Anhang	127



NOMENKLATUR

Abkürzungen

EEG	Erneuerbare Energien Gesetz
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> - Weltklimarat
IEA	Internationale Energieagentur
IRENA	<i>International Renewable Energy Agency</i>
NETL	<i>National Energy Technology Laboratory</i>
US DOE	<i>US Department of Energy</i>
EPRI	<i>Electric Power Research Institute</i>
gew.	gewichts- bzw. massenbezogen
IBTC	<i>International Biomass Torrefaction Council</i>
AWL	<i>Anhydrous Weight Loss</i> - Torrefizierungsgrad
TG	<i>Torrefaction Degree</i> - Torrefizierungsgrad
IAPWS	<i>International Association for the Properties of Water and Steam</i>
FDBR	Fachverband Dampfkessel-, Behälter- und Rohrleitungsbau
HD	Hochdruck
MD	Mitteldruck
ND	Niederdruck
KZÜ	Kalte Zwischenüberhitzung
HGI	<i>Hardgrove Grindability Index</i>
BWI	<i>Bond Working Index</i>
Re	Reynolds-Zahl
Pr	Prandtl-Zahl
IFEU	Institut für Energie- und Umweltforschung
LKW	Lastkraftwagen
MVR	Mitverbrennungsrate
k. A.	keine Angabe
vgl.	vergleiche



Abkürzungen

ggf.	gegebenenfalls
sog.	sogenannt
u. a.	und andere; unter anderem
ca.	circa

Chemische Symbole

CO ₂	Kohlenstoffdioxid
KCl	Kaliumchlorid
Cl	Chlor
HCl	Salzsäure
NO _x	Stickoxide
CO	Kohlenstoffmonoxid
CH ₄	Methan
C ₂ H ₄ O ₂	Essigsäure
H ₂ O	Wasser
HCO ₂ H	Ameisensäure
CH ₃ OH	Methanol
C ₃ H ₆ O ₃	Milchsäure
C ₅ H ₄ O ₂	Furfural
C ₃ H ₆ O ₃	Hydroxyaceton

Lateinische Symbole

P	spezifische Leistung	Wh/kg, kWh/t
T	Temperatur	K
p	Druck	bar
V	Volumen	l, m ³
m	Masse	kg, t
W	Arbeit	Wh, kWh
H	Wassergehalt	%
M	Stoffwert Mahlbarkeit	-

Lateinische Symbole

d	Durchmesser	m
G	Flächenbezogener Heizgasmassenstrom	kg/(m ² s)
x	Durchmesser, Länge	m, mm
a, b, c, d	Konstanten	-
K	Konstante	-
u	Strömungsgeschwindigkeit	m/s
k	Rohrrauigkeit	m
c _p	Spezifische Wärmekapazität	kJ/kg
\dot{m}	Massenstrom	kg/s
\dot{Q}	Wärmestrom	kW, MW
A, B, C, V ₁ , V ₂	Pseudoprodukte	-
H	Heizwert	MJ/kg
E _A	Aktivierungsenergie	J/mol
k ₀	Präexponentieller Faktor	-

Griechische Symbole

γ	Massenanteil	-,%
α	Wärmeübergangskoeffizient	W/(m ² K)
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/(m K)
ζ	Parameter	-
Δ	Differenz	-
ρ	Dichte	kg/m ³

Indizes

el	elektrisch
th	thermisch
v	<i>volatile</i> - gasförmig
L	Luft
BM	Biomasse
SK	Steinkohle
0	Grundwert/Startwert



Indizes

1	Vor der Mahlung
2	Nach der Mahlung
g	Gas
i	Innen
dp	Druckverlust
roh	roher Zustand
tr	trockener Zustand
torr	torrefiziert
ges	Gesamt
Reaktor	Reaktor
HD	Heizdampf
HG	Heizgas
waf	Wasser- und Aschefrei
o	oberer
u	unterer
C	Kohlenstoff
H	Wasserstoff
O	Sauerstoff
N	Stickstoff
S	Schwefel
H ₂ O	Wasser
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
m	Polymerisationsgrad



1 EINLEITUNG

Fossile Energieträger tragen weltweit maßgeblich zur Bereitstellung elektrischer Energie bei. In Deutschland betrug der Anteil aus Stein- und Braunkohle an der insgesamt produzierten Strommenge im Jahr 2014 etwa 43% [1]. Die damit zwangsläufig verbundenen CO₂-Emissionen stehen im Verdacht, sich negativ auf das Weltklima auszuwirken [2]. Es gibt daher Bestrebungen, die Emissionen klimarelevanter Gase zu reduzieren, um eine Steigerung der globalen Durchschnittstemperatur um 2 °C gegenüber dem Niveau der vorindustriellen Zeit zu begrenzen [3]. Um dieses Ziel zu erreichen, ist laut Weltklimarat (*Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC*) bis zum Jahr 2050 eine Reduktion der CO₂-Emissionen um 50 – 85%, bezogen auf das Jahr 2000, nötig [4].

Die Internationale Energieagentur (IEA) erwartet, dass der Stromverbrauch in den nächsten Jahren weiter ansteigt [5]. Um die steigende Nachfrage decken und die genannten Reduktionsziele trotzdem einhalten zu können, kommt u. a. die verstärkte Nutzung regenerativer Energien zur Stromerzeugung in Frage. Durch das Erneuerbare Energien Gesetz (EEG) [6] konnte in Deutschland bereits eine deutliche Steigerung der Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien erreicht werden. Der Großteil der Einspeisung nach dem EEG basiert auf der Erzeugung aus fluktuierenden Energieträgern wie Sonne und Wind [1], regelbare Leistung kann im Rahmen des EEG nur durch Wasserkraftwerke und mittels kleiner Biomassekraftwerke bereit gestellt werden. Durch eine Beschränkung der förderfähigen Anlagengröße bei der Nutzung von Biomasse zur Stromerzeugung nach dem EEG ergeben sich vergleichbar geringe Wirkungsgrade bei hohem Investitionsaufwand.

Die derzeit in Deutschland nicht geförderte Mitverbrennung von Biomasse in Kohlekraftwerken bietet eine weitere Möglichkeit, regelbare Leistung aus erneuerbaren Energieträgern bereitzustellen. Dabei wird ein Teil des Brennstoffs Kohle durch Biomasse, wie z. B. Holz, substituiert, wodurch eine direkte Reduktion der CO₂-Emissionen erreicht werden kann. Durch die Nutzung vorhandener Kohlekraftwerke können vergleichbar hohe Wirkungsgrade bei niedrigen Investitionskosten realisiert werden.



1.1 Motivation

Die Nutzung biogener Festbrennstoffe wie Holz hackschnitzel in kohlebefeueten Dampfkraftwerken fñhrt im Vergleich zur Nutzung des Brennstoffs Steinkohle zu verschiedenen Nachteilen u. a. bei Transport, Lagerung und Mahlung. Hauptursachen dieser Nachteile sind die hygroskopischen Eigenschaften der Biomasse und damit verbundene hohe Wassergehalte, die geringen volumetrischen Energiedichten sowie die zähe Faserstruktur. Um diesen Nachteilen zu begegnen, kommen in großen Mitverbrennungsprojekten im europäischen Ausland meist importierte Holzpellets zum Einsatz. Bei der Pelletierung kommt es zu einer Erhöhung der volumetrischen Energiedichte sowie zu verbesserten Eigenschaften bei der Mahlung. Durch eine der Pelletierung vorhergehende Trocknung wird der Wassergehalt gesenkt. Um eine erneute Wasseraufnahme zu unterbinden, müssen Holzpellets allerdings bei Transport und Lagerung vor Feuchtigkeit geschützt werden.

Weiter verbessern lassen sich die Brennstoffeigenschaften von Holz durch geeignete Vorbehandlungsmethoden. In der Literatur werden verschiedene Methoden insbesondere der thermischen Vorbehandlung diskutiert. Als vielversprechende Methode wird dabei die Torrefizierung angesehen. Dabei wird Holz zunächst getrocknet und dann in inerter Atmosphäre einer leichten pyrolytischen Behandlung unterzogen. Ein Teil der flüchtigen Brennstoffkomponenten wird dabei ausgetrieben. Das feste Produkt der Torrefizierung weist eine Reihe von Vorteilen hinsichtlich der Mitverbrennung in einem kohlebefeueten Dampfkraftwerk auf: Das teilweise Austreiben der flüchtigen Bestandteile führt in Kombination mit einer anschließenden Pelletierung zu einer Erhöhung der massen- und volumenbezogenen Energiedichte und somit zu Vorteilen bei der Logistik. Die Oberflächenbeschaffenheit verändert sich während der Torrefizierung. Das torrefizierte Holz verhält sich hydrophob und kann dadurch ohne Schutz vor Feuchtigkeit gelagert werden. Durch die teilweise Zerstörung strukturgebender Bestandteile des Holzes während der thermischen Behandlung wird außerdem die Mahlbarkeit erheblich verbessert.

Einem Torrefizierungsreaktor muss unabhängig von Reaktordesign und Betriebsweise zunächst Wärme zugeführt werden, um die Biomasse auf Reaktionstemperatur aufzuheizen. Erfahrungen aus der Trocknung von Braunkohle zeigen, dass die Integration solcher Vorbehandlungsschritte in den

Kraftwerksprozess gegenüber der getrennten Aufstellung einer Vorbehandlungsanlage vorteilhaft sein kann [7]. An Kraftwerksstandorten sind üblicherweise große Mengen Niedertemperaturwärme vorhanden, die ggf. zur Beheizung von Vorbehandlungsreaktoren verwendet werden können.

1.2 Ziel und Abgrenzung der Arbeit

In den letzten Jahren ist die Anzahl von Publikationen über die Torrefizierung stark gestiegen [8]. Der überwiegende Teil der Arbeiten beschäftigt sich mit dem Torrefizierungsprozess als alleinstehende Prozessoperation und bezieht sich auf ein spezielles Teilthema im Zusammenhang mit der Torrefizierung. Beispiele hierfür sind die Durchführung von Torrefizierungsexperimenten in Laborreaktoren [9], [10], [11], die Beurteilung der Eigenschaften torrefizierter Biomassen [12], [13], [14] und die mathematische Modellierung von Torrefizierungsprozessen [15], [16], [17]. Eine Verknüpfung des Torrefizierungsprozesses mit einem Kraftwerksprozess ist dagegen nur Gegenstand einer dem Autor bekannten Veröffentlichung, bei der die Möglichkeit der Integration eines Torrefizierungsprozesses in ein biomassebefeuertes Dampfkraftwerk mit Wärmeauskopplung evaluiert wird [18]. Die vorliegende Arbeit soll durch die Betrachtung integrierter Vorbehandlungsprozesse helfen, diese Lücke zu schließen. Die Verfahrensschritte Trocknung und Torrefizierung werden zum einen in einen Kraftwerksprozess integriert und zum anderen als alleinstehende Anlage zur Erzeugung torrefizierter und nicht torrefizierter Holzpellets modelliert.

Als Basisprozess für die Modellierung der Vorbehandlung im Kraftwerk wird ein Modell eines für Deutschland repräsentativen, mit Steinkohlestaub befeuerten Dampfkraftwerks aus den 1970er Jahren erstellt. Notwendige Wärme- und Kühlleistungen des Trockners und des Torrefizierungsreaktors werden ganz oder teilweise vom Kraftwerksprozess bereitgestellt. Geeignete Betriebsparameter des Torrefizierungsprozesses sowie geeignete Maßnahmen zur Integration von anfallenden Abwärmemengen werden identifiziert. Ziel ist ein möglichst effizienter Gesamtprozess von der Anlieferung nasser Biomasse zum Endprodukt Strom über die Prozessschritte Trocknung, Torrefizierung und Verstromung. Dieser erste Teil der Modellierungs- und Simulationsarbeiten zeigt mögliche Potentiale einer Vorbehandlung durch Trocknung und Torrefizierung von holzartiger Biomasse am Kraftwerksstandort auf.



Die Modellvariante zur Betrachtung einer vom Kraftwerk unabhängigen Vorbehandlung durch Trocknung, Torrefizierung und Pelletierung trägt der zunehmenden Bedeutung des Imports holzartiger Biomassen aus Übersee Rechnung. Dabei kommen dieselben Teilmodelle und Prozessschritte wie bei der Vorbehandlung am Kraftwerksstandort zur Anwendung, ergänzt durch ein Modell zur Berechnung der Pelletierung. Notwendige Wärme- und Kühlleistungen werden durch die Verbrennung von Biomasse und durch ein gesondertes Kühlsystem bereitgestellt.

Die Vorbehandlung am Kraftwerksstandort sowie am Ort des Biomasseanfalls werden abschließend unter Einbeziehung einfacher Transportbilanzen hinsichtlich der Parameter energetische Effizienz und spezifische CO₂-Emissionen miteinander verglichen und bewertet. Außerdem erfolgt im Rahmen des Importszenarios ein Vergleich zwischen torrefizierten und nicht torrefizierten Holzpellets.

1.3 Vorgehensweise

Nachdem in Kapitel 2 der Stand der Technik der Mitverbrennung von Biomasse und der Torrefizierung dargelegt wird, erfolgt in Kapitel 3 eine Einführung in die Grundlagen des Torrefizierungsprozesses.

In Kapitel 4 werden die betrachteten Varianten und die zur Bewertung verwendete Kennzahl definiert, bevor in Kapitel 5 die Modellierungsarbeiten am Basismodell des Kraftwerks sowie an den zur Trocknung, Torrefizierung und Pelletierung zusätzlich notwendigen Komponenten beschrieben werden.

Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen werden in Kapitel 6 vorgestellt, diskutiert und bewertet.

Eine Zusammenfassung schließt die Arbeit mit Kapitel 7 ab.

2 STAND VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK

In Kapitel 2 wird zunächst ein kurzer Überblick über maßgebliche, weltweite Aktivitäten bezüglich der Mitverbrennung von Biomasse gegeben und die derzeitige Situation in Deutschland vorgestellt. Anschließend wird der aktuelle Stand von Wissenschaft und Technik der Mitverbrennung von nicht torrefizierter sowie von torrefizierter Biomasse in kohlebefeuchten Dampfkraftwerken beschrieben.

2.1 Weltweite Aktivitäten

Die Aktivitäten hinsichtlich der Entwicklung und Anwendung der Mitverbrennung von Biomasse sind aufgrund unterschiedlicher wirtschaftlicher Anreizmechanismen sowie lokal vorhandener Biomassepotentiale stark länderspezifisch ausgeprägt. Potentiale zur Bereitstellung erheblicher Mengen Biomasse für die Mitverbrennung sind z. B. in Nordamerika aber auch in den skandinavischen Ländern vorhanden und begründen das grundlegende Interesse der lokalen Energieindustrie [19]. Politisch motivierte Anreizmechanismen ermöglichen durch den Import von biogenen Festbrennstoffen auch Ländern ohne nennenswerte eigene Biomassepotentiale die Anwendung der Mitverbrennung.

KOPPEJAN kommt in einer Zählung aus dem Jahr 2009 auf weltweit 155 Anlagen, die in den vergangenen Jahren durch Testkampagnen oder kommerziellen Betrieb Erfahrungen mit der Mitverbrennung von Biomasse gesammelt haben [20], [21]. Die globale Verteilung der erfassten Anlagen, der Anteil von Anlagen mit Staubfeuerung und die jeweiligen Mitverbrennungsraten sind in Tabelle 2.1 dargestellt. Die Tabelle macht deutlich, dass sich der größte Teil der Anlagen mit Erfahrungen auf dem Gebiet der Mitverbrennung in Europa befindet, gefolgt von Nordamerika. Knapp 40% der in [20] erfassten Anlagen ist mit einer Staubfeuerung ausgerüstet. Die Mitverbrennung in staubbefeuchten Anlagen stellt damit die bedeutendste Technologie dar.

Neuere Studien bestätigen diese Ergebnisse und zeigen eine weitere Zunahme der Anzahl von Kraftwerksanlagen mit Erfahrungen bei der Mitverbrennung seit 2009. CREMERS erfasst in einer Studie aus dem Jahr 2012 insgesamt 234 Anlagen mit Erfahrungen auf dem Gebiet der Mitverbrennung von Biomasse. 98 der Anlagen arbeiten mit einer Staubfeuerung und stellen damit die größte Teilgruppe, gefolgt von 89 Anlagen mit Wirbelschichtfeuerung [22], [23]. Die *International Renewable*

Energy Agency (IRENA) zählt im Jahr 2013 weltweit etwa 230 Kraftwerksanlagen mit einer Leistung zwischen 50 und 700 MW_{el}, die zur Produktion von Strom und ggf. auch Wärme neben dem Hauptbrennstoff Kohle Biomasse mitverbrennen [24].

Tabelle 2.1: Globale Verteilung der Kraftwerksanlagen mit Erfahrungen bei der Mitverbrennung von Biomasse im Jahr 2009 nach KOPPEJAN [20]; die zu Grunde liegenden Daten sind teilweise unvollständig

	Weltweit	Europa	Noramerika	Asien	Australien
Anzahl aller Anlagen	155	115	32	4	8
Anlagen mit Staubfeuerung	60	25	27	0	8
Anlagen mit MVR < 5%	21	2	11	k.A.	8
Anlagen mit MVR 5% - 10%	9	7	2	k.A.	0
Anlagen mit MVR 10% - 30%	16	6	10	k.A.	0
Anlagen mit MVR > 30%	44	39	5	k.A.	0

Nordamerika

Die USA und Kanada stellen nach [20] den zweitgrößten Anteil an Anlagen mit Erfahrungen im Bereich der Mitverbrennung von Biomasse. In den USA kam es u. a. durch ein groß angelegtes Forschungsvorhaben in Zusammenarbeit des *National Energy Technology Laboratory* (NETL), des *US Department of Energy* (US DOE) und des *Electric Power Research Institute* (EPRI) ab dem Jahr 1996 zu großem Interesse verschiedener Anlagenbetreiber an der Mitverbrennung von Biomasse [25]. Inzwischen sind die Aktivitäten vor allem in den USA trotz erheblicher Biomassepotentiale praktisch zum Erliegen gekommen. Als Gründe werden neben derzeit niedrigen Gaspreisen u. a. verschärfte Umweltschutzanforderungen, die Stilllegung älterer Kohlekraftwerke während der Rezession von 2008 bis 2011 sowie ein Mangel an bundesweiten Fördermechanismen genannt [22].

Europa

In den europäischen Ländern mit hohen Biomassepotentialen wie Finnland und Schweden wird Biomasse seit vielen Jahren meist in dezidierten Biomasseanlagen mit Rost- oder Wirbelschichtfeuerung eingesetzt [25]. Staubbefeuerte Anlagen und der Einsatz von Steinkohle kommen dagegen nur vereinzelt vor; die Mitverbrennung spielt dadurch nur eine untergeordnete Rolle. Der europäische und damit auch der globale Schwerpunkt der Mitverbrennung von Biomasse liegt derzeit in Nordwesteuropa [22]. Durch verschiedene staatliche Anreizprogramme konnten vor allem in den Niederlanden, Dänemark und Großbritannien erhebliche

Fortschritte erzielt und viele kommerzielle Mitverbrennungsprojekte mit hohen Mitverbrennungsraten erfolgreich umgesetzt werden [25].

Deutschland

Die Förderung der Erzeugung von Elektrizität aus Biomasse nach dem EEG [6] beschränkt sich auf ausschließlich mit Biomasse befeuerte Anlagen mit einer maximalen Anlagengröße von 20 MW_{el}. Vor dem Inkrafttreten des EEG im Jahre 2000 wurde die Mitverbrennung von Biomasse in einigen Kraftwerken getestet und erwogen [25]. Nach Einführung des EEG werden Althölzer und andere Biomassen in Deutschland hauptsächlich in dezidierten Biomasseanlagen, in der Regel mit Rost oder Wirbelschichtfeuerung, eingesetzt. Die auch für Althölzer garantierte Vergütung durch das EEG führt zu hohen Altholzpreisen und macht die Mitverbrennung in kohlebefeuchten Anlagen derzeit unwirtschaftlich.

Viele Großkraftwerke in Deutschland haben Erfahrung mit der Mitverbrennung von Klärschlamm in kleinen Mengenanteilen meist unter 1 gew.-%. Im Jahr 2005 wurde in 10 Kraftwerksanlagen Klärschlamm mitverbrannt [25]. Aufgrund der niedrigen Massenanteile in Verbindung mit den geringen Heizwerten der Klärschlämme sind diese Aktivitäten jedoch eher im Bereich der Entsorgung als zur Erzeugung von Elektrizität einzuordnen.

2.2 Mitverbrennung nicht torrefizierter Biomasse

Welchen Einfluss die Mitverbrennung von holzartiger Biomasse auf die bestehende Anlagentechnik hat und ob zusätzliche Anlagentechnik erforderlich ist, hängt stark von der Art der eingesetzten Biomasse und der angestrebten Mitverbrennungsrate ab.

Holzhackschnitzel

Die Mitverbrennung durch Mitvermahlung in der meist zur Kohlemahlung installierten Walzenschüsselmühle stellt die einfachste Art der Mitverbrennung dar. Bei der Verwendung von Holzhackschnitzeln ist die Mitverbrennungsrate dabei auf etwa 5 gew.-% beschränkt [26]. Die Steigerung der Mitverbrennungsrate über die genannte Größenordnung hinaus erfordert bei der Verwendung von Holzhackschnitzeln die Installation dezidierter Biomassemühlen, meist kommen Hammermühlen zum Einsatz. Dadurch entfallen Limitierungen der Kohlemühlen. Je nach Holzart und Feuchtegehalt kommt es beim Einsatz von Holzhackschnitzeln durch hohe Anforderungen einer Staubfeuerung an die maximale

Brennstoffpartikelgröße und durch das teilweise elastische Verhalten und die faserartige Struktur des Holzes zu einem hohen Energiebedarf bei der Mahlung [27]. Aufgrund der im Vergleich zum Brennstoff Steinkohle niedrigeren Schüttguldichten und Heizwerte werden außerdem deutlich größere Brennstoffmengen und -volumina erforderlich, die den regionalen Brennstoffbezug erschweren und enorme Lagerkapazitäten erfordern. Aus diesen Gründen haben sich für Mitverbrennungsraten von etwa 10%th und mehr bereits international gehandelte Holzpellets als Brennstoff weitgehend durchgesetzt [28].

Holzpellets

Bei der Verwendung von Holzpellets sind höhere Mitverbrennungsraten sowohl durch den Einsatz von Hammermühlen als auch durch die Umstellung einzelner Kohlemühlen auf die Mahlung von 100% Holzpellets möglich. Bei der Anpassung von Walzenschüsselmühlen an die Mahlung von Holzpellets werden zur Erhöhung der Reibung zwischen Walzen und Schüssel von einigen Betreibern Löcher in die Mahlschüssel eingebracht [29]. Durch Anpassung des Mühlensichters können Vorgaben hinsichtlich der maximal zulässigen Partikelgrößen am Austritt erreicht werden. In manchen Fällen erfolgt außerdem eine Optimierung der räumlichen Orientierung der Mahlwalzen. Um die Mühlen vor Explosionen und Feuer zu schützen, erfolgt eine Absenkung der Mühlenlufteintrittstemperatur auf Werte um 110 °C [22]. Zur Aufrechterhaltung nötiger Förderluftgeschwindigkeiten bei abgesenkter Lufttemperatur können innerhalb der Mühle Leitbleche montiert werden. Diese vergleichbar einfachen Anpassungen sind nur bei Verwendung von Holzpellets als Brennstoff ausreichend, weil in der Kohlemühle hauptsächlich eine Auflösung der Pellets in die ursprüngliche Partikelgröße vor der Pelletierung erfolgt [30]. Dadurch ist die Mahlung von Holzpellets auch mit deutlich geringerem Energiebedarf als die Mahlung von Holzhackschnitzeln verbunden. Die aus verbrennungstechnischen Gründen nötige maximale Partikelgröße von etwa 1 mm kann bei beiden Mühlenkonzepten eingehalten werden.

Holzstaubzugabe und Brenner

Nach der Mahlung in Biomassemühlen oder entsprechend angepassten Kohlemühlen wird die Biomasse entweder der Kohlestaubleitung zugegeben oder über ausschließlich mit Biomasse betriebene Brenner dem Feuerraum zugeführt [31]. Als Biomassebrenner kommen weiterentwickelte oder entsprechend angepasste Kohlebrenner zum Einsatz. Dabei wird meist der Drall der Primärluft

erhöht, um eine Verkürzung der aufgrund der größeren Biomassepartikel verlängerten Flammen zu erreichen. In manchen Fällen wird auch die Verteilung der Brennerluft zwischen Primär- und Sekundärluft angepasst.

Verschmutzung und Korrosion

Auch bei Mitverbrennungsraten von 30%th und höher kommt es beim Einsatz von Holz in der Regel nur zu geringfügigen Auswirkungen auf die Kesselverschmutzung durch Ablagerungen und Verschlackung, zudem wird nur selten von deutlich verstärkten Korrosionserscheinungen berichtet. Dieses positive Verhalten ist zum einen durch die bei Holz im Vergleich zu anderen Biomassen, wie z. B. Stroh, geringen Gehalte problematischer Komponenten wie Kalium und Chlor zu erklären. Zum anderen kommt es durch Bestandteile der Kohleasche zu Einbindungseffekten, welche die Korrosions- und Verschlackungsneigung der Biomasse deutlich reduzieren. Dieser Effekt ist im Wesentlichen auf die Kohleaschebestandteile Aluminium und Silizium zurückzuführen, die im Feuerraum Aluminosilikate mit hohen Schmelzpunkten bilden und dabei Komponenten wie Kalium binden können. Durch die Einbindung von Kalium entsteht deutlich weniger gasförmiges Kaliumchlorid (KCl), welches vor allem auf den konvektiven Heizflächen des Dampferzeugers kondensieren und dadurch zu Verschlackung und Korrosion insbesondere im Bereich der Überhitzerheizflächen führen kann. Das im Zusammenhang mit Korrosion gefährliche Chlor (Cl) reagiert dann zu gasförmiger Salzsäure (HCl) und wird nach Verlassen des Dampferzeugers in der Rauchgasentschwefelungsanlage abgeschieden. Der beschriebene positive Effekt der Kohleasche gilt als einer der wesentlichen Vorteile der Mitverbrennung von Biomasse gegenüber der Nutzung von Biomasse in Biomassekraftwerken [22], [25], [32], [33]. Auch bei der Mitverbrennung von Biomassen mit höheren Gehalten an problematischen Bestandteilen, wie z. B. Stroh, werden die beschriebenen Effekte beobachtet, allerdings kann Verschlackung und Korrosion aufgrund der höheren Gehalte an Kalium und vor allem Chlor in Stroh nur bis zu gewissen Mitverbrennungsraten wirkungsvoll verhindert werden [22]. Bei höheren Mitverbrennungsraten und der Verbrennung von 100% Biomasse können die Einbindungseffekte durch die Zugabe von Kohleaschen sowie durch die Verwendung ähnlich wirkender Additive oder Mineralien wie Kaolin erreicht werden [32], [34].

Emissionen

Hinsichtlich der Emissionen von Stick- und Schwefeloxiden kann durch die Mitverbrennung von Biomasse meist eine Verbesserung erreicht werden. Niedrige Stickstoffgehalte der Biomassen führen zu einer potentiellen Reduktion der gebildeten Stickoxide. Zusätzlich kommt es durch den hohen Anteil flüchtiger Komponenten in der Biomasse zu einer Verstärkung der meist als Primärmaßnahme zur NO_x- Minderung angewendeten Luftstufung und dadurch zur Reduktion der Emissionen von NO_x. Verbesserungen der Schwefeloxidemissionen können durch die deutlich geringeren Gehalte an Schwefel in holzartigen Biomassen sowie durch Einbindungseffekte der Aschen erklärt werden. Auf die Emissionen von Kohlenmonoxid und Staub hat die Mitverbrennung in der Regel keinen oder nur geringen Einfluss. Anfängliche Beschränkungen bei der Vermarktung der Aschen wurden durch die Novellierung der EN450¹ in 2012 deutlich reduziert. Es können in der Regel 40 – 50 gew.-% Biomasse mitverbrannt und zugleich die zur Vermarktung der Aschen nötigen Qualitätsstandards eingehalten werden [35].

Wirkungsgrade

Hinsichtlich des erreichbaren Anlagenwirkungsgrads wird bei der Verwendung von Holzpellets von vergleichbaren oder nur leicht verringerten Werten im Vergleich zum Kohlebetrieb berichtet [28], [36], [37]. Durch höheren Energieaufwand bei der Mahlung oder höhere Wassergehalte kann es bei Holzhackschnitzeln oder anderen biogenen Brennstoffen aber zu stärkeren Auswirkungen kommen.

Fazit

Anhand der beschriebenen Aktivitäten und des Standes der Technik wird ersichtlich, dass die Mitverbrennung von Biomasse in Form von Holzpellets auch bei höheren Biomasseanteilen über 30%_{th} als technisch machbare und inzwischen in vielen Fällen bewährte Technologie angesehen werden kann. Verschiedene Anlagenbetreiber haben bereits viele Jahre Erfahrung mit dem kommerziellen Betrieb kohlebefeuerter Anlagen mit Mitverbrennung von Biomasse [38], auch die Zahl von Umrüstungsprojekten auf den Betrieb mit 100% Biomasse hat aufgrund

¹ EN450: Norm zur Definition von Anforderungen an Flugaschen für den Einsatz bei der Betonherstellung

guter Erfahrungen und veränderter politischer Rahmenbedingungen in den letzten Jahren zugenommen.

2.3 Mitverbrennung torrefizierter Biomasse

Beim Einsatz in staubbefeuerten Dampferzeugern haben Biomassen wie Holz und Holzpellets im Vergleich zum Brennstoff Steinkohle verschiedene Nachteile. Neben geringen Heizwerten und Schüttgutdichten erschweren hygroskope Eigenschaften Transport und Lagerung [28]. Die Zerkleinerung und Mahlung von Holz ist mit hohem energetischem Aufwand verbunden [27]. Das gilt beim Einsatz und der Mahlung von Holzhackschnitzeln am Kraftwerksstandort ebenso wie bei der Verwendung von Holzpellets, wo das Holz vor der Produktion der Pellets zunächst ebenfalls zerkleinert werden muss.

Torrefizierung

Aus den genannten Gründen gibt es Bestrebungen, auf die physikalischen Eigenschaften sowie die chemische Zusammensetzung von Biomassen wie Holz noch vor der Verwendung zur Mitverbrennung durch thermische Vorbehandlungsmethoden positiv einzuwirken. In der Literatur wird die Torrefizierung als derzeit vielversprechendste Vorbehandlungsmethode bezeichnet [39]. Dabei wird die zu behandelnde Biomasse in möglichst inerte Atmosphäre auf Temperaturen zwischen 250 und 300 °C erhitzt und dadurch ein Teil der flüchtigen Komponenten ausgetrieben. So kann gezielt Einfluss auf verschiedene Parameter wie Heizwert, Schüttgutdichte, Mahlbarkeit und das Wasseraufnahmeverhalten genommen werden [40]. Für eine detaillierte Beschreibung des Prozesses der Torrefizierung und der Auswirkungen dieses Prozesses auf die Biomasseeigenschaften wird auf Kapitel 3 dieser Arbeit verwiesen. Im Folgenden wird der derzeitige Stand der Technik der Torrefizierung sowie der Mitverbrennung torrefizierter Biomasse beschrieben.

Stand der Entwicklungen

Zahlreiche Firmen und Forschungsinstitute arbeiten an der Entwicklung von Torrefizierungsverfahren und -reaktoren. BATIDZIRAI et al. [41] listen in einer Veröffentlichung aus dem Jahr 2013 etwa 30 Firmen und Institute auf, die sich mit der Entwicklung eines Torrefizierungsreaktors beschäftigen. Die Aktivitäten reichen dabei von der Entwicklung kleinerer Forschungsreaktoren an Universitäten und Forschungseinrichtungen [42], [43] bis zur Entwicklung kommerzieller Torrefizierungsreaktoren und integrierter Gesamtanlagen zur Trocknung,

Torrefizierung und Pelletierung von Biomasse [44], [45]. Der Großteil der Aktivitäten beschränkt sich auf die Torrefizierung von Holz, wenige Beteiligte arbeiten auch mit Stroh oder anderen Biomassen. Dabei kommen verschiedene Reaktortypen zum Einsatz. Einige Ansätze sind als Weiterentwicklungen von Anlagen aus der Trocknungstechnik zu verstehen und basieren auf Band- oder Drehrohrtrocknern. Andere verwenden Festbettreaktoren oder verschiedene Wirbelschichttechnologien. Auch eigens entwickelte Reaktortechnologien wie ein auf Mikrowellentechnologie basierender Ansatz werden verfolgt [41], [46]. Trotz des hohen Interesses und enormer Aktivitäten verschiedener Unternehmen konnte bisher in keiner Anlage ein kommerzieller Betrieb aufgenommen werden. Die Aktivitäten beschränken sich auf Pilotanlagen, die zu Demonstrationszwecken bereits bis zu einer Produktionskapazität von bis zu 60 kt/a erfolgreich getestet wurden [47].

Feldversuche

Im Rahmen von Feldtestkampagnen wurden vereinzelt torrefizierte Holzpellets in kohlestaubbefeuerten Kraftwerken mitverbrannt. Der Betreiber Vattenfall hat im Jahr 2011 eine Testkampagne im Heizkraftwerk Reuter West in Berlin durchgeführt. Der Standort Reuter West verfügt über zwei kohlestaubbefeuerte Blöcke, die jeweils eine Leistung von bis zu 300 MW_{el} und 293 MW_{th} erzeugen können. Bei der Entladung und Förderung der per Schiff angelieferten Pellets wurde vermehrte Staubbildung registriert, der aber unter Verwendung der vorhandenen Staubunterdrückungssysteme erfolgreich entgegen gewirkt werden konnte. Die Lagerung erfolgte von Mai bis Juli ohne Überdachung auf der normalen Kohlehalde. Insgesamt wurden an neun Testtagen über 4.000 t vorbehandelter Pellets mitverbrannt. Fünf Tage lang wurden zunächst 20 gew.-% (16%_{th}) mitverbrannt, danach wurden für jeweils zwei Tage 35 gew.-% (29%_{th}) sowie 50 gew.-% (43%_{th}) erfolgreich mitverbrannt. Damit wurde die Möglichkeit der Mitverbrennung hoher Biomasseanteile ohne Anpassung oder Veränderung der verwendeten Lager-, Förder- und Anlagentechnik demonstriert. Der Betreiber sieht damit die Machbarkeit einer kostengünstigen Mitverbrennung vorbehandelter Pellets bestätigt [48], [49].

Im Jahr 2013 wurden zu Versuchszwecken 2.300 t torrefizierter Pellets der Firma Topell im Kraftwerk Amer in den Niederlanden eingesetzt. Dabei wurden bis zu 25 gew.-% torrefizierter Biomasse in einer Kohlemühle gemahlen und erfolgreich

mitverbrannt. Hinsichtlich Staubentwicklung, Mahlung und Flammenstabilität wurden keinerlei negative Auswirkungen festgestellt [50], [51]. Auch der Betreiber Engie (vormals GDF Suez) hat in den Kraftwerken Ruin in Belgien und Gelderland in den Niederlanden bereits Erfahrungen mit torrefizierten Pellets gesammelt [52]. Der kanadische Betreiber Gulf Power hat im Kraftwerk Scholz in Ontario Versuche mit torrefizierter Biomasse durchgeführt [53].

Fazit

Vor allem bei höheren Mitverbrennungsraten kann es trotz der nötigen Vorbehandlungsanlage zu Kostenvorteilen durch die Verwendung torrefizierter Biomasse kommen [40]. Auch große Betreiber von Mitverbrennungsanlagen wie Drax Power aus England sehen klare Vorteile der vorbehandelten Pellets gegenüber den derzeit hauptsächlich eingesetzten Holzpellets. Aufgrund des nicht vorhandenen Marktes an torrefizierten Holzpellets haben sich die Verantwortlichen aber vor der Umrüstung von drei Kraftwerksblöcken des Kraftwerks Drax auf 100% Biomasse für den Einsatz nicht torrefizierter Holzpellets entschieden [28]. Marktbeobachter schätzen die derzeitige Situation ähnlich ein wie bei normalen Holzpellets vor etwa 15 Jahren: Die Technologie ist in verschiedenen Fällen bis zur Marktreife entwickelt, aber der kommerzielle Betrieb konnte aufgrund der Zurückhaltung vieler Kraftwerksbetreiber noch nicht aufgenommen werden [38]. Um die Handelbarkeit torrefizierter Holzpellets zu verbessern, arbeitet das *International Biomass Torrefaction Council* (IBTC) mit verschiedenen Partnern und Standardisierungsorganisationen an der Aufnahme von torrefizierten Holzpellets in die Norm ISO 17225 zur Regelung der Brennstoffspezifikationen von Biobrennstoffen [54]. Ziel dieser Entwicklung ist es, torrefizierte Holzpellets als leicht handelbaren Energierohstoff im internationalen Markt zu etablieren.



3 GRUNDLAGEN DER TORREFIZIERUNG VON BIOMASSE

Die grundlegenden Prinzipien der Torrefizierung wurden in den 1930er Jahren durch Forschungsarbeiten zur Entwicklung neuer Brennstoffe für Vergaseranlagen in Frankreich erarbeitet [55]. Nach einer darauffolgenden Ruhephase hat der Torrefizierungsprozess erst in den 1980er Jahren erneut Aufmerksamkeit auf sich gezogen, als der Einsatz torrefizierter Biomasse als Reduktionsmittel in metallurgischen Produktionsprozessen diskutiert wurde. In diesem Zusammenhang wurde im französischen Laval de Cère eine Anlage zur Produktion von 12.000 t/a torrefizierter Biomasse nach dem Pechiney-Prozess gebaut und für mehrere Jahre betrieben. In den 1990er Jahren folgte die Stilllegung aus wirtschaftlichen Gründen. Der Pechiney Prozess wurde infolge der angestrebten Verwendung des Produkts als Koksersatz bei vergleichbar niedrigen Temperaturen und sehr hohen Verweilzeiten betrieben und ist daher mit heutigen Anlagen zur Torrefizierung nicht direkt zu vergleichen. Der Fokus lag weniger auf hoher energetischer Ausbeute als auf maximiertem Kohlenstoffgehalt bei definiertem Wassergehalt [55].

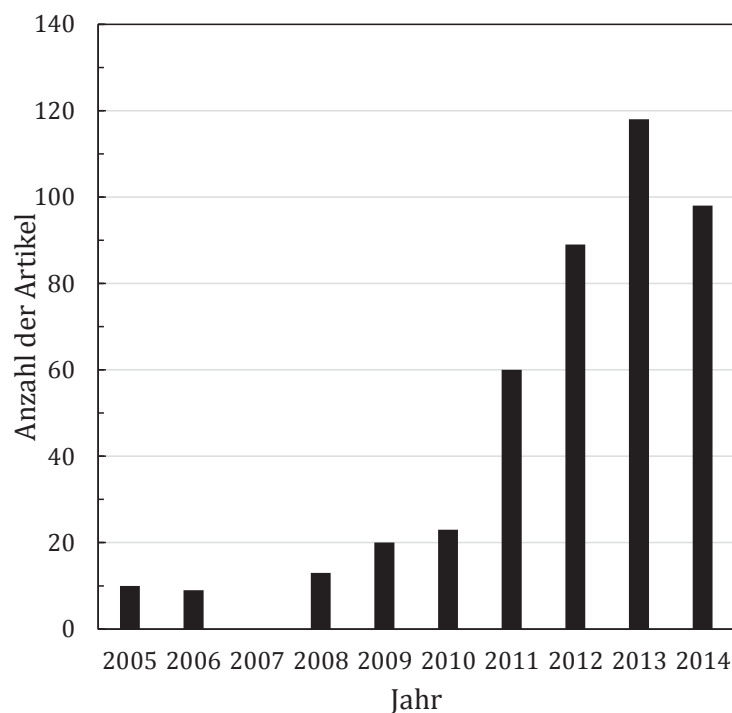


Abbildung 3.1: Anzahl der wissenschaftlichen Veröffentlichungen zum Thema Torrefizierung bis 11/2014 nach CHEN et al. [8]

Seit Mitte der 2000er Jahre besteht erneut verstärktes Interesse an Torrefizierungsanwendungen. Die Zahl an wissenschaftlichen Veröffentlichungen zur Thematik hat seitdem stark zugenommen, vgl. Abbildung 3.1. Eine Vielzahl der Untersuchungen hat die Entwicklung von Torrefizierungsreaktoren, die Erstellung geeigneter Simulationsmodelle, die Charakterisierung der Produkte aus der Torrefizierung oder die Untersuchung wirtschaftlicher Aspekte der Torrefizierung zum Ziel.

3.1 Brennstoff Biomasse

Vor der Beschreibung der Grundlagen des Torrefizierungsprozesses erfolgt zunächst ein Blick auf den Aufbau und die Zusammensetzung der eingesetzten Biomasse. Mit dem Begriff Biomasse wird im Allgemeinen biologisch abbaubares Material tierischer, pflanzlicher oder mikrobieller Herkunft bezeichnet, das nicht aus fossilen Quellen stammt [56]. Zur Verwendung bei der Torrefizierung kommen hauptsächlich holzartige Biomassen wie Stammholz, Waldrestholz oder Holz aus Kurzumtriebsplantagen sowie halmgutartige Biomassen wie Stroh oder Miscanthus in Frage. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Torrefizierung holzartiger Biomassen betrachtet.

3.1.1 Makromolekularer Aufbau

Auf makroskopischer Ebene sind die Bestandteile holzartiger Biomassen in die vier Gruppen Zellwandkomponenten, Extraktstoffe, Asche und Wasser einzuteilen. Die mit einem Anteil an der Gesamtmasse von mehr als 95 gew.-%_{tr} größte Gruppe ist die der Zellwandkomponenten [57]. Sie besteht aus den drei Makromolekülen Hemicellulose, Cellulose und Lignin, woraus sich die für holz- und halmgutartige Biomassen häufig verwendete Bezeichnung lignocellulose Biomasse ableitet. Zusammen mit Pectin und Glykoproteinen bindet die Hemicellulose die sog. Cellulosemikrofibrillen (Cellulosefasern) in einer vernetzten Matrix [58], [59]. Der Vergleich dieser Strukturen mit stahlbewährtem Beton liegt nahe; die Cellulosemikrofibrillen entsprechen dabei den verstärkenden Stahlstangen und die Hemicellulose dem Beton. Lignin befindet sich hauptsächlich zwischen den Zellen und hält diese zusammen. Durch das Ummanteln der Hemicellulose- und Celluloseanteile schützt es die Pflanze vor enzymatischen und mikrobiellen Angriffen [60].

Alle drei Makromoleküle sind Polymere, die sich in Art und Verknüpfung der einzelnen Monomere sowie im strukturellen Aufbau voneinander unterscheiden. Cellulose ist die Hauptkomponente der meisten Biomassen und dadurch die weltweit am weitesten verbreitete organische Komponente [61]. Sie bildet die Grundsubstanz der unverholzten Zellwände und ist für die Zugfestigkeit der Biomasse verantwortlich [57]. Es handelt sich bei Cellulose um ein lineares Homopolysaccharid, das nahezu vollständig aus etwa 10.000 – 15.000 D-Glucosemolekülen aufgebaut ist, die durch β -(1-4)-glycosidische Verbindungen verknüpft sind [62]. Cellulose weist sowohl kristalline als auch amorphe Strukturen auf und kann vereinfacht durch die Summenformel $(C_6H_{10}O_5)_m$ dargestellt werden, wobei der Index m den Grad der Polymerisation ausdrückt. Im Gegensatz zur Cellulose besteht Hemicellulose aus einer Mischung verschiedener Monosaccharide wie Xylose, Glucose, Mannose, Galactose, Arabinose sowie Gluconsäure; die Zusammensetzung der einzelnen Monomere kann je nach Biomasseart variieren. Außerdem liegt Hemicellulose als weitverzweigtes, amorphes Polymer vor. Die Funktionen der Hemicellulose in der Pflanze sind vielfältig und reichen von einer stützenden Wirkung in der Zellmembran bis zur Quell- und Klebstoffwirkung zur Verkittung der Zellmembran. Hemicellulose kann vereinfacht mit der Summenformel $(C_5H_8O_4)_m$ beschrieben werden [60], [63], [57]. Der eigentliche Füllstoff lignocelluloser Biomassen ist das Lignin, welches durch seine verkittende und versteifende Wirkung u. a. für die Druckstabilität des Holzes verantwortlich ist. Die Molekülstruktur von Lignin ist dreidimensional und stark verzweigt. Das Molekül besteht aus mit Hydroxy- und Methoxygruppen substituierten Phenylpropaneinheiten, die durch Ether und Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindungen verbunden sind [64]. Vor allem die Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindungen bewirken eine starke Widerstandsfähigkeit gegen thermische und chemische Einflüsse. Lignin kann vereinfacht mit der Summenformel $(C_9H_{10}O_3 \cdot (OCH_3)_{0,9-1,7})_m$ beschrieben werden [65].

Als Extraktstoffe werden durch Wasser oder andere Lösungsmittel extrahierbare Stoffe bezeichnet. Dazu zählen Proteine, Öle, Stärke und Zucker. Extraktstoffe sind für verschiedene Eigenschaften wie Farbe, Geruch und teilweise auch für Härte und Elastizität der Biomasse verantwortlich. Extraktstoffe machen für gewöhnlich nur einen niedrigen einstelligen prozentualen Anteil an der trockenen Gesamtmasse aus [61].

Der nach vollständiger Verbrennung verbleibende anorganische Feststoff wird als Asche bezeichnet. Häufig darin enthalten sind Carbonate, Phosphate, Sulfate,

Calcium, Magnesium, Natrium und Kalium. Viele der Stoffe dienen beim Wachstum einer Pflanze als Nährstoffe und werden in der Wachstumsphase über die Wurzeln aufgenommen. Nach der Verbrennung liegen die Aschebestandteile in der Regel in oxidierter Form vor. Auch bei der Ernte anhaftende Mineralstoffe wie Erde oder Sand finden sich in der Asche wieder. Typische Aschegehalte holzartiger Biomassen liegen zwischen 0,5 und 2 gew.-%_{tr} [8], [57].

Wasser ist in lebender Biomasse zu hohen Anteilen enthalten und übernimmt wichtige Aufgaben bei der Photosynthese, dem Nährstofftransport und der Transpiration. Es kann in gebundenes Wasser (innerhalb der Zellen) und freies Wasser (außerhalb der Zellen) eingeteilt werden [8]. Abhängig von Zeitpunkt und Art der Ernte liegen typische Wassergehalte von holzartigen Biomassen zwischen 30 und 60 gew.-%_{roh} [66].

3.1.2 Kurz- und Elementaranalyse

Die Beurteilung von Festbrennstoffen kann u. a. anhand von Kurz- und Elementaranalysen erfolgen. Bezüglich der Einflüsse eines Torrefizierungsprozesses auf holzartige Biomasse sind bei einer Elementaranalyse vor allem die Gehalte an Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff interessant. Um Unterschiede zwischen holzartiger Biomasse und dem Referenzbrennstoff der untersuchten Kraftwerksanlage zu verdeutlichen, sind außerdem die entsprechenden Werte für Steinkohle von Interesse. In Abbildung 3.2 sind exemplarisch Ergebnisse der Elementaranalysen von Weidenholz und Steinkohle bezüglich der drei genannten Komponenten dargestellt.

Aus verbrennungstechnischer Sicht unterscheiden sich die drei Bestandteile Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff hauptsächlich bezüglich ihres Beitrags zur Wärmefreisetzung bei der Verbrennung: Während die Komponenten Kohlenstoff und Wasserstoff bei der Verbrennung mit Sauerstoff oxidiert werden und dabei Wärme freigesetzt wird, kann Sauerstoff selbst nicht oxidiert werden und damit nicht zur Wärmefreisetzung beitragen. Hohe Sauerstoffgehalte sowie niedrige Kohlenstoffgehalte, wie in Abbildung 3.2 am Beispiel von Weidenholz dargestellt, führen demnach zu relativ geringen Heizwerten. Eine Vorbehandlung biogener Festbrennstoffe mit dem Ziel, den Heizwert zu erhöhen, kann demnach durch eine Reduktion des Sauerstoffgehalts bewirkt werden. Dadurch kommt es zu einem

Anstieg der spezifischen Gehalte an Kohlenstoff und Wasserstoff und somit auch zu einem höheren spezifischen Heizwert.

Auch die Ergebnisse einer Kurzanalyse können zum Vergleich der beiden Brennstoffe sowie zur Beurteilung einer Torrefizierung hilfreich sein. Exemplarische Ergebnisse der Kurzanalysen der bereits in Abbildung 3.2 dargestellten Brennstoffe sind in Abbildung 3.3 dargestellt.

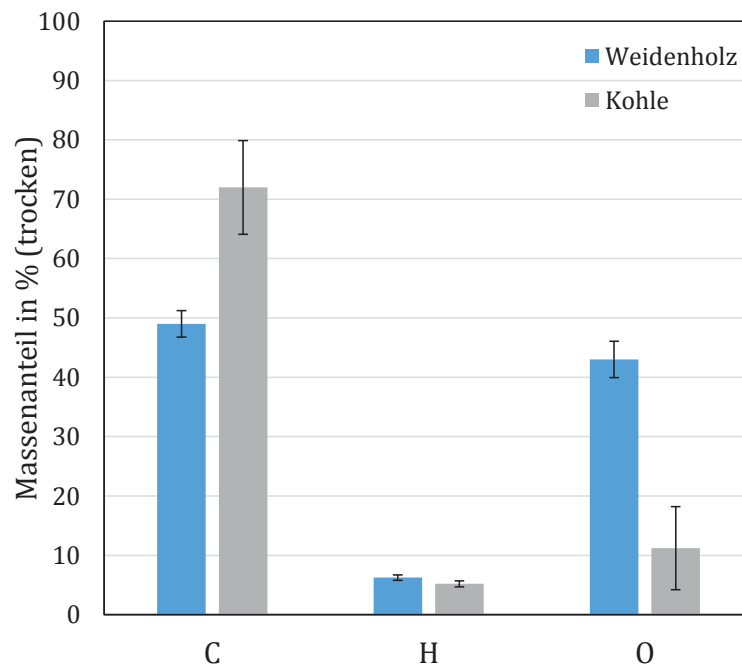


Abbildung 3.2: Ergebnisse der Elementaranalysen von Weidenholz und Steinkohle nach [60], [67]

Als flüchtige Bestandteile (kurz: Flüchtige) wird der Anteil eines Festbrennstoffs bezeichnet, der ausgehend vom absolut trockenen Zustand mittels Aufheizung unter definierten Bedingungen durch pyrolytische Zersetzung in die Gasphase übergeht; die Bestimmung erfolgt gemäß DIN 51720. Der nach Bestimmung des Gehaltes an flüchtigen Komponenten zurückbleibende Feststoff setzt sich aus den ebenfalls dargestellten Bestandteilen Asche und sog. gebundenem Kohlenstoff zusammen. Dabei ist zu beachten, dass der gebundene Kohlenstoff weitestgehend aber nicht vollständig aus Kohlenstoff zusammengesetzt ist. Entsprechend muss ein Großteil der in Abbildung 3.2 dargestellten Gehalte an Wasserstoff und Sauerstoff in den flüchtigen Bestandteilen enthalten sein. Eine Reduktion des Gehalts an flüchtigen Bestandteilen kann somit zu einer Steigerung des spezifischen Gehalts an

Kohlenstoff und zu einer Senkung des spezifischen Gehalts an Sauerstoff führen und den spezifischen Heizwert einer Biomasse erhöhen.

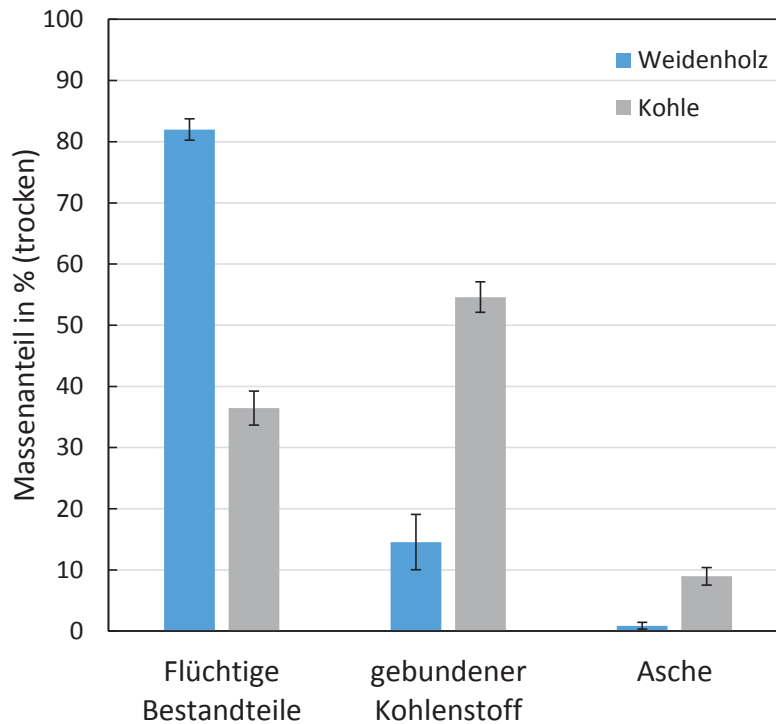


Abbildung 3.3: Typische Ergebnisse einer Kurzanalyse von Weidenholz und Steinkohle nach [56], [60], [68], [69]

3.2 Prozess der Torrefizierung

Das thermochemische Verfahren Torrefizierung kann nach BASU [70] wie folgt definiert werden:

„Torrefizierung bezeichnet einen thermochemischen Prozess in inerter oder sauerstoffarmer Umgebung, bei dem Biomasse langsam bis zu einem definierten Temperaturbereich erhitzt und für eine bestimmte Zeit in diesem Temperaturbereich gehalten wird, sodass nahezu der komplette Anteil an Hemicellulose abgebaut wird sowie der Massen- und Energieertrag maximiert werden.“

Der Begriff Torrefizierung ist dem Französischen entlehnt, „*torréfaction*“ bedeutet Röstung und bezeichnet z. B. das Rösten von Kaffee. In der Literatur werden

außerdem die Bezeichnungen Rösten, langsame oder milde Pyrolyse und Hochtemperaturtrocknung synonym für den Begriff Torrefizierung verwendet [55]. Auch eine Unterscheidung zwischen leichter Torrefizierung im Temperaturbereich bis 250 °C und starker Torrefizierung im Temperaturbereich oberhalb 250 °C wird vorgeschlagen [65]. Daneben wird in der Literatur die Anwendung von Torrefizierungsprozessen in wässriger Umgebung unter Druck und Temperatureinfluss diskutiert, der trockene Prozess hat sich für die Entwicklung kommerzieller Anwendungen jedoch durchgesetzt [70].

Eine Abgrenzung der Torrefizierung gegenüber anderen thermischen Vorbehandlungsmethoden für Biomassen kann anhand unterschiedlicher Zielstellungen, Temperaturbereiche und Aufheizraten erfolgen, siehe Tabelle 3.1.

Tabelle 3.1: Abgrenzung der drei thermischen Vorbehandlungsmethoden Torrefizierung, Karbonisierung und Pyrolyse

Prozess	Ziel	Temperaturbereich	Heizrate
Torrefizierung	Festes Produkt mit gesteigerter Energiedichte; Maximierung des Massen- und Energieertrags	200 - 300 °C	niedrig
Karbonisierung	Festes Produkt; Maximierung des Kohlenstoffgehalts	250 - 600 °C	niedrig
Pyrolyse	Flüssiges Produkt, Pyrolyseöl	400 - 600 °C	hoch

Die Pyrolyse unterscheidet sich von der Torrefizierung vor allem durch das Ziel, möglichst hohe Anteile flüssiger Produkte zu erzeugen, sowie durch relativ hohe Aufheizraten. Die Karbonisierung hat eine Maximierung des Kohlenstoffgehalts zum Ziel, Massen- und Energieerträge sind in der Regel deutlich niedriger als bei der Torrefizierung.

3.2.1 Thermochemische Vorgänge bei der Torrefizierung

Für die physikalischen und chemischen Veränderungen holzartiger Biomassen bei der Torrefizierung sind maßgeblich Depolymerisationsreaktionen der drei makromolekularen Bestandteile Hemicellulose, Cellulose und Lignin verantwortlich. Nach BERGMAN et al. [55] können die Vorgänge bei der Torrefizierung von Biomasse in fünf Temperaturbereiche unterteilt werden. Diese Temperaturbereiche sind in Abbildung 3.4 für die Bestandteile Hemicellulose, Cellulose und Lignin dargestellt und werden im Folgenden am Beispiel von Hemicellulose beschrieben. In der Realität folgen die beteiligten Vorgänge keiner klaren Abgrenzung sondern gehen fließend ineinander über.

- Bereich A (50 – 120 °C):
Beim Bereich A handelt es sich um den nichtreaktiven Trocknungsbereich. Es kommt zu einer Änderung der physikalischen Feuchte, die chemische Zusammensetzung bleibt unverändert. Durch die Trocknung schrumpft die Biomasse, kann aber durch anschließendes Wässern ihre Struktur zurückgewinnen. Der Prozess ist bis zu diesem Punkt reversibel.
- Bereich B (120 – 150 °C):
Bei weiterer Erwärmung kommt es zur Erweichung des enthaltenen Lignins. Diese Eigenschaft wird bei der Pelletierung genutzt, um durch die Bindungseigenschaften des Lignins harte und beständige Pellets zu erzeugen. Auf die Torrefizierung hat die Erweichung des Lignins keinen Einfluss.

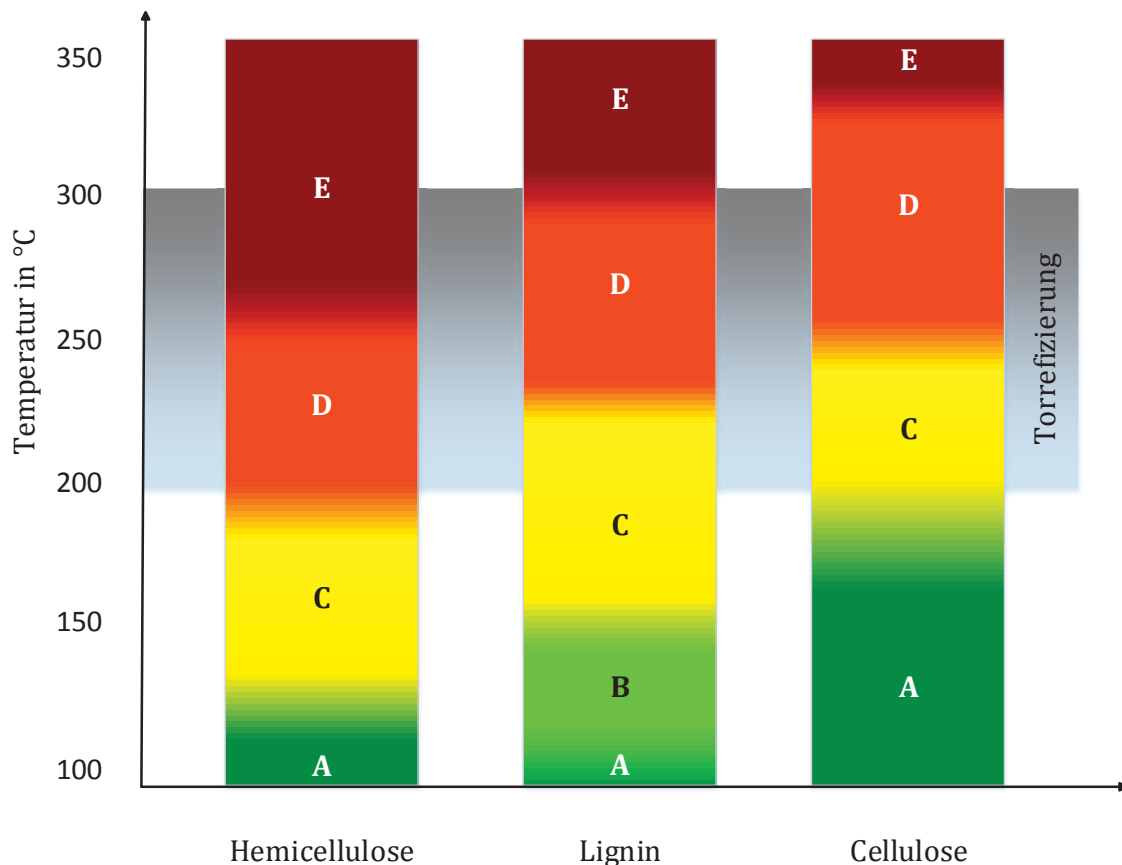


Abbildung 3.4: Grundlegende physikalisch-chemische Phänomene beim Aufheizen lignocelluloser Biomasse unter Luftabschluss nach [55], [71]

- Bereich C (150 – 200 °C):
Im Temperaturbereich über 150 °C setzt die reaktive Trocknung ein. Sie wirkt sich durch erste Strukturveränderungen der Biomasse aus. Es handelt sich hierbei um irreversible Trocknungsvorgänge, die nicht durch anschließendes Wässern rückgängig gemacht werden können. Bei Annäherung an 200 °C beginnen sich erste Wasserstoff- und Kohlenstoffbindungen aufzulösen, und die Depolymerisation der Hemicellulose setzt langsam ein. Dadurch entstehen gekürzte Polymere, die zunächst innerhalb der festen Strukturen wieder kondensieren.
- Bereich D (200 – 250 °C):
Die Temperaturbereiche D und E repräsentieren die maßgebliche Torrefizierungszone für Hemicellulose und damit die Torrefizierung insgesamt. Im Bereich D kommt es zur ersten Ausgasung und Karbonisierung der im Bereich C geformten Strukturen. Dabei werden die meisten inter- und intramolekularen Wasserstoffbindungen, Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindungen und Kohlenstoff-Sauerstoff-Bindungen aufgelöst [72].
- Bereich E (250 – 300°C)
Im Bereich E kommt es zu starker Zersetzung der Hemicellulose in flüchtige Gase und festes Produkt. Cellulose und Lignin werden nur in beschränktem Maße ausgegast und karbonisiert. Es kommt zur kompletten Zerstörung der Biomassestruktur; das feste Produkt wird nahezu frei von faserigen Strukturen und damit spröde und brüchig.

3.2.2 Produkte der Torrefizierung

Insgesamt ist die Zersetzung der Hemicellulose durch Depolymerisation der maßgebliche Reaktionsschritt bei der Torrefizierung. Dabei werden Wasserstoff- und Kohlenstoffbindungen aufgelöst und es kommt zu Dehydratation und Decarboxylierung sowie zu einer Reihe weiterer destruktiver Reaktionsschritte. Die dabei potentiell entstehenden festen und gasförmigen Produkte sind in Abbildung 3.5 dargestellt. Die entstehenden nichtkondensierbaren Gase bestehen hauptsächlich aus CO, CO₂ sowie geringen Anteilen CH₄ und weiterer einfacher Kohlenwasserstoffe. Die kondensierbaren Gase enthalten langkettige organische Komponenten wie Einfach- und Mehrfachzucker, Säuren, Alkohole u. a. Außerdem sind auch Lipide wie Terpene, Waxe oder Fettsäuren enthalten. Der entstehende Feststoff besteht im Wesentlichen aus Holzkohle, verschiedenen Polymerstrukturen,

verschiedenen Zuckern und Asche [55], [70]. Generell gilt, dass die Mengen und Zusammensetzungen der Produkte stark von den Prozessbedingungen, der Reaktionsführung und der eingesetzten Rohbiomasse abhängen.

3.2.3 Eigenschaften der festen Torrefizierungsprodukte

In der Literatur wird von der Möglichkeit berichtet, durch Torrefizierung einen qualitativ hochwertigen Brennstoff mit vergleichbaren Eigenschaften wie Steinkohle erzeugen zu können [46]. Im Folgenden wird der Einfluss der Torrefizierung auf die im Rahmen dieser Arbeit wichtigsten Brennstoffparameter Mahlbarkeit und Energiedichte erläutert und dargestellt. Anschließend erfolgt ein kurzer Überblick über die Auswirkungen der Torrefizierung auf weitere Eigenschaften holzartiger Biomasse.

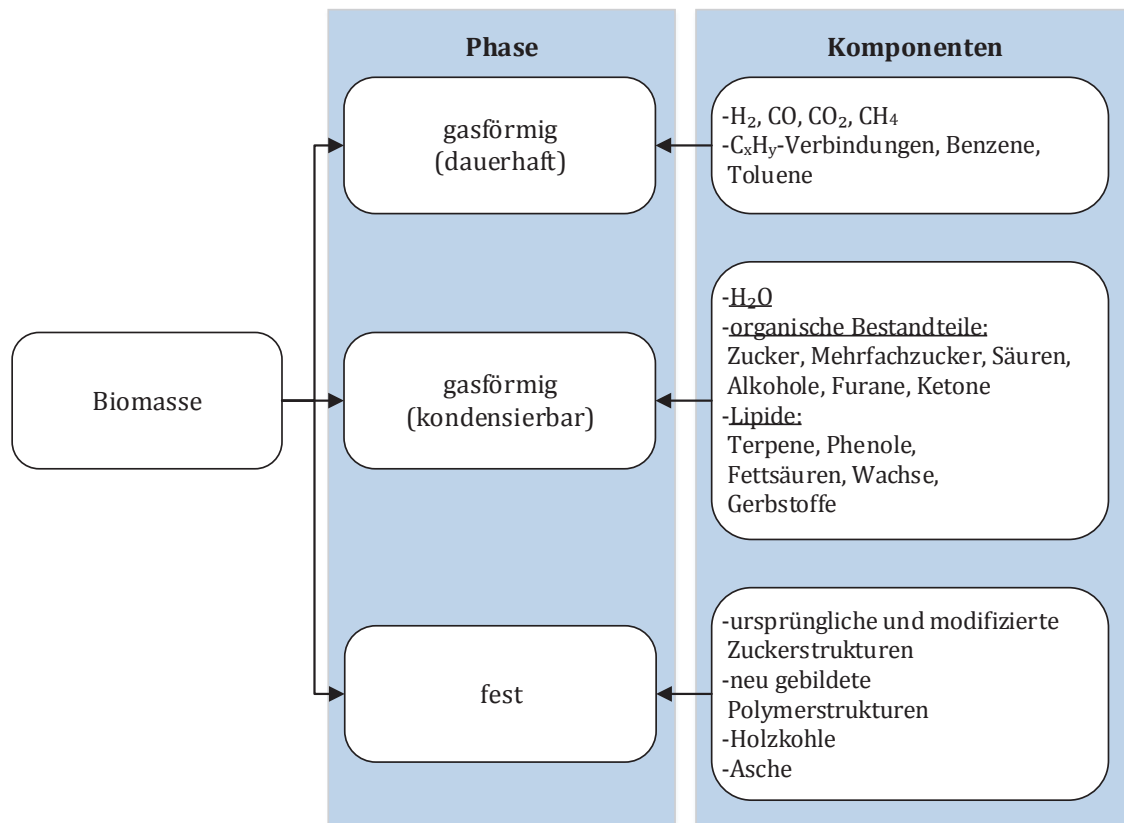


Abbildung 3.5: Produkte der Torrefizierung von Biomasse nach [55]

Mahlbarkeit

Eine Verbesserung der Mahlbarkeit holzartiger Biomasse durch Torrefizierung wird entsprechend den erläuterten Vorgängen durch die teilweise Zerstörung der strukturegebenden Matrix aus Cellulose und Hemicellulose in den Zellwänden erreicht [55], wobei die Depolymerisation der Hemicellulose maßgeblichen Anteil hat. Die verbleibenden Polymerketten werden kürzer, es kommt zu einer deutlichen Reduktion von festen und stabilen Strukturen, was sich durch sprödes und brüchiges Verhalten der torrefizierten Biomasse ausdrückt und die Mahlbarkeit verbessert [46]. BERGMAN et al. [55] haben bei der Mahlung torrefizierter Biomassen in einer Schneidmühle eine Reduktion des Energieaufwands um 50 – 85% gegenüber der Mahlung unbehandelter Biomasse mit 10 – 15% Wassergehalt gemessen. Zudem konnte der Durchsatz der Mühle um den Faktor 2 bis 6,5 erhöht werden. Andere Autoren berichten von einer Reduktion des Energieaufwands bei der Mahlung um bis zu 90% [73].

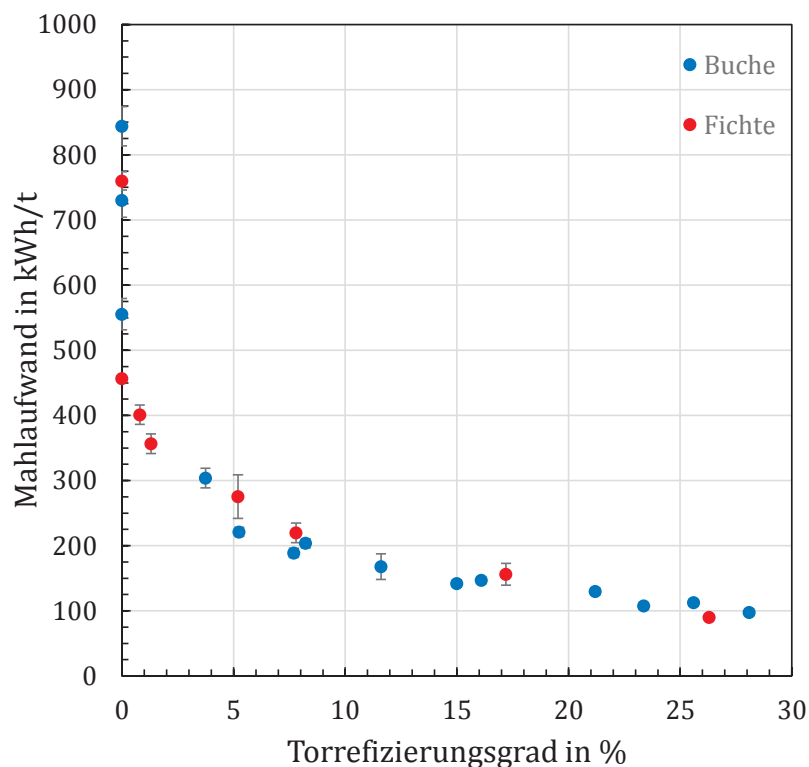


Abbildung 3.6: Energieaufwand zur Feinmahlung von Birken- und Kiefernholz mit einer Schneidmühle in Abhängigkeit von der Torrefizierungsintensität nach [74]

In Abhängigkeit vom Torrefizierungsgrad kann der Mahlaufwand auf vergleichbare Werte wie bei der Mahlung von Steinkohle sinken [70]. Beispielhaft ist in Abbildung

3.6 der Energieaufwand zur Mahlung von rohem sowie torrefiziertem Birken- und Fichtenholz in einer Schneidmühle dargestellt. Der Mahlaufwand sinkt bereits bei Torrefizierungsgraden zwischen 10 und 15% deutlich ab, bei intensiverer Torrefizierung sinkt der Mahlaufwand weiter, allerdings weniger schnell. Großtechnische Erfahrungen sowohl mit der Mahlung torrefizierter Biomassen in Hammermühlen als auch mit der Mitvermahlung in Kohlemühlen liegen derzeit nicht vor [46].

Durch Torrefizierung sinkt nicht nur der Energieaufwand bei der Mahlung. Sie wirkt sich auch positiv auf die Qualität des gemahlten Produkts aus. Gemahlene Rohbiomasse weist durch zylindrische Formen und faserartige Strukturen meist hohe Sphärizitätswerte auf und ist inhomogen. Durch Torrefizierung vor der Mahlung werden die Biomassepartikel nach der Mahlung runder und weisen dadurch deutlich geringere Sphärizitäten auf; das Produkt wird deutlich homogener [75]. Die Partikelgrößenverteilung ändert sich ebenfalls: Es kommt bei gleichbleibenden Parametern des Mühlensichters zu einer Verschiebung hin zu kleineren Partikeln, die spezifische Oberfläche der Partikel nach der Mahlung ist entsprechend größer als bei der Mahlung nicht torrefizierter Biomassen [73]. BATIDZIRAI et al. berichten bei der Mahlung torrefizierter Biomassen von Partikelgrößenverteilungen, Sphärizitäten und spezifischen Oberflächen, die vergleichbar mit denen bei der Mahlung von Steinkohle sind [41], [73].

Energiedichte

Die bei der Torrefizierung in den gasförmigen Zustand überführten Anteile entstehen zunächst überwiegend aus den Bindungsbestandteilen der depolymerisierten Hemicellulose wie Hydroxyl- und Carboxylgruppen. Dazu kommen teils restrukturierte Bestandteile der zersetzten Polysaccharide. Ein Großteil der ausgetriebenen Verbindungen ist gekennzeichnet durch hohe Sauerstoffgehalte bei relativ niedrigen Gehalten an Kohlenstoff, wodurch der Heizwert des entstehenden Torrefizierungsgases niedrige Werte um 5 – 10 MJ/kg annimmt. Somit kann durch die Torrefizierung anteilig mehr Masse als Energiegehalt in das Torrefizierungsgas überführt werden. Das Austreiben niederkalorischer Verbindungen führt beim resultierenden Feststoff zu einer Erhöhung des Heizwerts von etwa 17 - 18 MJ/kg_{tr} auf ca. 19 – 22 MJ/kg_{tr}. Eine vereinfachte Massen- und Energiebilanz ist zur Verdeutlichung in Abbildung 3.7 dargestellt.

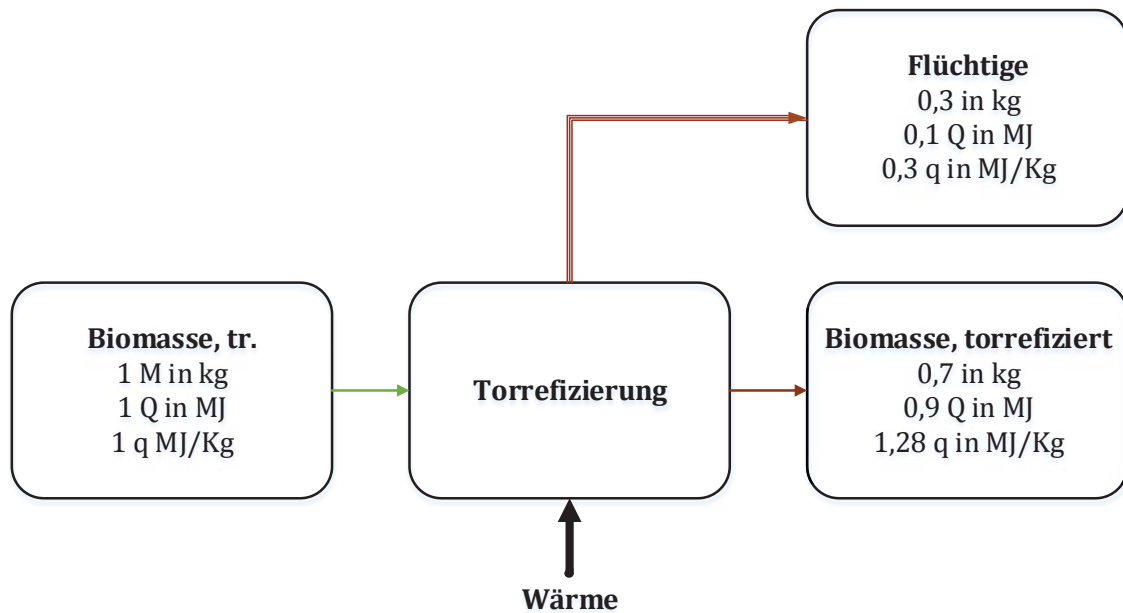


Abbildung 3.7: Schematische Abbildung eines Torrefizierungsprozesses mit typischen Werten für den Massen- und Energieertrag nach [70] und [76]

Das Austreiben flüchtiger Bestandteile bei der Torrefizierung von Holzhackschnitzeln führt zur Bildung von Hohlräumen und Poren innerhalb der Biomassepartikel, und es kommt zu Schrumpfeffekten. Anschließendes Pelletieren der torrefizierten Biomasse führt zu einem Produkt mit deutlich gesteigerter volumetrischer Energiedichte [46]. Typische Werte der volumetrischen Energiedichte von Holzhackschnitzeln, Holzpellets, torrefizierten Holzpellets und Steinkohle sind in Abbildung 3.8 dargestellt.

Durch Torrefizierung und Pelletierung kann die volumenbezogene Energiedichte demnach gegenüber Holzhackschnitzeln etwa um den Faktor 4 bis 5 erhöht werden. Im Vergleich zu normalen Holzpellets sind Steigerungen um den Faktor 2 möglich. Die Schüttgutdichte erhöht sich dabei von Werten um 250 kg/m^3 bei Holzhackschnitzeln auf $700 - 800 \text{ kg/m}^3$ bei torrefizierten Holzpellets und liegt damit in der Größenordnung von Steinkohle. Im Vergleich dazu weisen normale Holzpellets Schüttgutdichten von etwa 675 kg/m^3 auf [60]. Dadurch können zum Transport torrefizierter Holzpellets die für Steinkohle vorhandenen Transportmittel verwendet werden, volumenoptimierte Transportmittel wie sie beim Transport von nicht torrefizierten Holzpellets teilweise zum Einsatz kommen sind nicht notwendig.

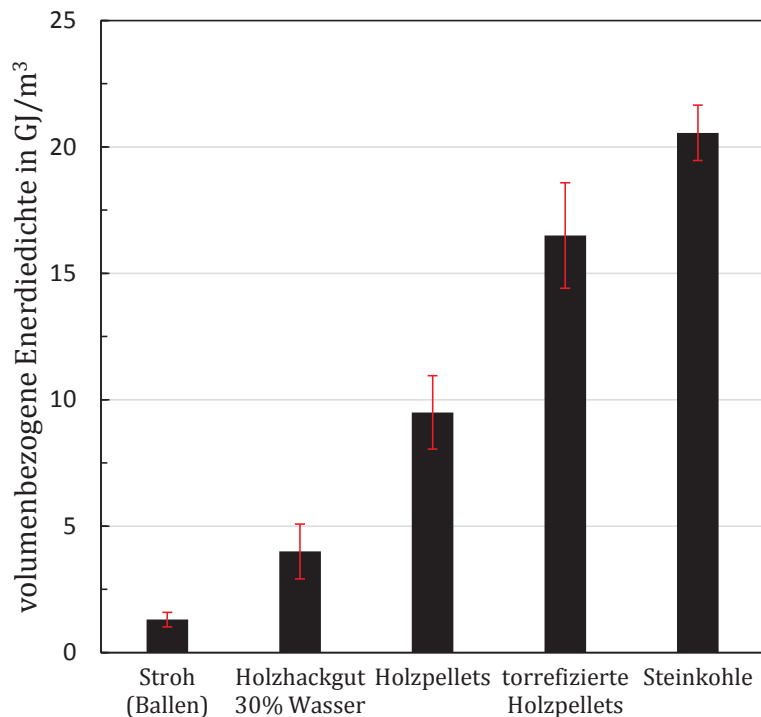


Abbildung 3.8: Volumetrische Energiedichte verschiedener Brennstoffe nach [55], [60], [77]

Weitere Eigenschaften

Zahlreiche Studien belegen, dass Torrefizierung das hygroskope Verhalten von Biomasse hin zu hydrophobem Verhalten verändert. Dabei nimmt die Hydrophobizität mit zunehmender Intensität der Torrefizierung zu [73], [78], [79]. Wasser wird in roher Biomasse in den Zellwänden adsorbiert, indem es von den Wasserstoffbindungen der Hydroxylgruppen an den Zellwandkomponenten gebunden wird [80]. Dabei hat die Hemicellulose im Vergleich zu Lignin und Cellulose die höchste Wasseradsorptionsfähigkeit [81]. Die Zersetzung der Hemicellulose bei der Torrefizierung führt zu einer Zerstörung der Hydroxylgruppen, die dann kein Wasser mehr binden können. Durch chemische Restrukturierung werden an Stelle der Hydroxylgruppen ungesättigte, unpolare Verbindungen erzeugt. Diese führen dazu, dass die Hemicellulose weniger Wasser adsorbieren kann [46], [72]. Außerdem verhindert der ebenfalls unpolare Charakter von Teeren, die innerhalb der Poren kondensieren, die Kondensation von Wasserdampf [82], [83]. Insgesamt wird die Wasseraufnahme deutlich reduziert; es wird bei torrefizierten Biomassen von Gleichgewichtswassergehalten zwischen 1

und 5 gew.-% berichtet [84], [85]. Gesteigerte Hydrophobizität und damit einhergehende niedrige Wassergehalte verhindern biologische Degradation und mögliche Selbstentzündung der Biomassen effektiv [46]. Daraus ergeben sich erhebliche Vorteile bei Transport und Lagerung; Abdeckungen zum Schutz vor Feuchtigkeit sind nicht mehr zwingend notwendig. Geringe Wassergehalte sowie der Schutz vor Wiederbefeuchtung wirken sich außerdem positiv auf den Heizwert aus.

Die Auswirkungen der Mitverbrennung torrefizierter Biomasse auf einen kohlebefeuchten Dampferzeuger werden in einer Studie der niederländischen Firma KEMA [37] untersucht. Die Ergebnisse von Simulationsrechnungen eines Dampferzeugers mit Mitverbrennung von 56 gew.-% torrefizierter Biomasse mit der Simulationsumgebung Spence® zeigen nur geringfügige Veränderungen gegenüber dem Kohlebetrieb. Das Temperaturprofil im Dampferzeuger hat sich durch reduzierte Flammentemperaturen im Feuerraum geringfügig nach hinten verschoben, wodurch die Kesselaustrittstemperaturen leicht angestiegen sind. Die Autoren der Studie gehen davon aus, dass diese Einflüsse durch kleinere Veränderungen der Regelungstechnik abgefangen werden können und dass dadurch eine Absenkung des Kesselwirkungsgrads vermieden werden kann. Laut NBIBE et al. [86], [87] kommt es hinsichtlich der Emissionsbildung bei der Mitverbrennung torrefizierter Biomasse zu ähnlichen Ergebnissen wie bei der Mitverbrennung von nicht torrefiziertem Holz.

Sicherheitsrelevante Verbesserungen der Brennstoffeigenschaften ergeben sich unmittelbar aus den hydrophoben Eigenschaften der torrefizierten Biomasse [88]. Durch die Versprödung der Biomasse können torrefizierte Holzpellets im Vergleich zu nicht torrefizierten Pellets weniger stabil sein und zu verstärkter Staubbildung neigen. Aufgrund hoher Gehalte an flüchtigen Komponenten und relativ niedriger Zündtemperaturen besteht dadurch ein Risiko zur Explosions- und Feuerbildung [89], [90]. Bezüglich des Aspekts des Brand- und Explosionsschutzes können durch Torrefizierung nur teilweise Vorteile erreicht werden.

Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass die Torrefizierung nur wenig Einfluss auf die Gehalte problematischer Biomassebestandteile wie Kalium, Chlor und Phosphor hat [46]. Beim Einsatz von Biomassen mit besonders hohen Chlorgehalten wie Stroh wird von einer Reduktion der Chlorgehalte bei der Torrefizierung um 10 – 50% berichtet [42]. Sinkende Emissionen von HCl beim Einsatz torrefizierter Biomassen bestärken diesen Zusammenhang [91]. Trotz einer möglichen Reduktion des Chlorgehalts sollte aufgrund der bereits beschriebenen positiven

Wechselwirkungen zwischen problematischen Bestandteilen der Biomassen wie Kalium und der Kohleasche die Mitverbrennung zusammen mit Kohle der alleinigen Verbrennung torrefizierter Biomasse vorgezogen werden. Die Eigenschaften der Kohleaschen dominieren bei der Mitverbrennung von Holz auch bei hohen Mitverbrennungsraten und ermöglichen die Reduktion von Verschlackungs- und Korrosionserscheinungen im Dampferzeuger auf ein tolerierbares Niveau.

3.2.4 Sinnvolle Prozessparameter

Temperaturen und Verweilzeiten

Aus den in Kapitel 3.2.1 beschriebenen Vorgängen und Bereichen lassen sich sinnvolle Temperaturbereiche für die Torrefizierung von Biomasse ableiten. Eine Torrefizierung bei 200 °C oder leicht höheren Temperaturen ist aufgrund der sehr limitierten Zersetzungsprozesse in diesem Temperaturbereich nicht anzustreben. In der Literatur werden aus diesen Gründen untere Grenzen für sinnvolle Temperaturbereiche von 220 °C [75], 225 °C [92], [93] oder 230 °C [94] vorgeschlagen. Eine obere Grenze ergibt sich durch starke Entgasung und Karbonisierung sowie durch den erhöhten Abbau von Lignin, was die in vielen Fällen der Torrefizierung nachfolgende Pelletierung erheblich erschweren kann. Auch die thermische Zersetzung von Cellulose und die bei Temperaturen oberhalb 300 °C entstehenden Teere erschweren die Nutzung der Torrefizierungsgase und beschränken den Temperaturbereich der Torrefizierung nach oben [94]. BERGMAN et al. [55] haben auf der Basis systematisch durchgeführter Torrefizierungs- und Mahlversuche sowie geeigneter Simulationsrechnungen die für einen wirtschaftlichen Betrieb sinnvollen Bereiche für die Parameter Temperatur und Verweilzeit anhand der Kriterien Mahlbarkeit, Effizienz und technische Machbarkeit festgelegt. Demnach soll ein Torrefizierungsreaktor möglichst im Temperaturbereich zwischen 260 und 300 °C betrieben werden. Die Autoren empfehlen den Betrieb eines Reaktors bei etwa 300 °C und eine zum Erreichen vorgegebener Torrefizierungsgrade oder Produkteigenschaften minimal mögliche Verweilzeit [55].

Dabei ist zu beachten, dass durch die Wärmeübertragung auf die Biomasse keine konstante Torrefizierungstemperatur eingestellt werden kann. Es ergibt sich eine Temperaturkurve. Von vielen Autoren wird dennoch nur eine „Torrefizierungstemperatur“, meist die Torrefizierungsendtemperatur, angegeben.

Die Verweilzeit oder Torrefizierungsdauer wird von verschiedenen Autoren unterschiedlich definiert. Bei BERGMAN et al. [55] beginnt die Torrefizierungsdauer mit dem Überschreiten einer Temperatur von 200 °C und sollte im Bereich zwischen 7,5 und 30 min liegen, PRINS [92] versteht unter dem Begriff Torrefizierungsdauer den Zeitbereich, den eine Biomasseprobe auf Zieltemperatur gehalten wird. Andere Autoren beschreiben die Torrefizierungsdauer als gesamte Verweilzeit im Reaktor oder geben überhaupt keine Werte an. Durch die unterschiedlichen Definitionen und Angaben zu Torrefizierungstempertatur und Torrefizienzzeit in der Literatur, sind die Ergebnisse verschiedener Autoren oft nicht oder nur schwer miteinander zu vergleichen.

Intensität der Torrefizierung

Die Definition einer von Temperatur und Verweilzeit unabhängigen Kennzahl zur Beschreibung der Intensität der Torrefizierung kann Abhilfe schaffen. Eine Möglichkeit ist die Bestimmung und Angabe des wasserbereinigten Massenverlusts AWL (*Anhydrous weight loss*) einer Biomasse durch Torrefizierung [8], [95], vgl. Gleichung 1.

$$AWL [\%] = \frac{m_{roh,tr} - m_{torr,tr}}{m_{roh,tr}} \cdot 100 [\%] \quad (1)$$

Auch andere von den Reaktionsparametern unabhängige Ansätze zur Beschreibung der Torrefizienzintensität werden vorgeschlagen. Die Firma ANDRITZ [44] berechnet den Torrefizienzgrad TG (*Torrefaction degree*), indem die Gehalte flüchtiger Komponenten γ_v vor und nach der Torrefizierung ins Verhältnis gesetzt werden, siehe Gleichung 2.

$$TG [\%] = 1 - \frac{\gamma_{v,torr}}{\gamma_{v,roh}} \cdot 100 [\%] \quad (2)$$

Beide Kennzahlen können die Intensität der Torrefizierung vergleichbar gut beschreiben. Aufgrund der einfacheren Bestimmung von AWL gegenüber TG wird diese Kennzahl im weiteren Verlauf dieser Arbeit verwendet. Typische Torrefizienzgrade liegen je nach Zielsetzung im Bereich von 15 - 30% (AWL). Bereits bei 15% wird die Mahlung erheblich erleichtert. Um eine möglichst starke Erhöhung der Energiedichte zu erreichen, kommen intensiver torrefizierte Biomassen mit Torrefizienzgraden um 30% in Frage.

3.3 Reaktortypen

Die in der Entwicklung von Torrefizierungsprozessen aktiven Unternehmen, Hochschulen und Forschungseinrichtungen arbeiten an verschiedenen Reaktortechnologien. Viele der vorgeschlagenen Reaktortypen wurden ursprünglich für andere Anwendungen, wie z. B. zur Trocknung, konzipiert [46]. Oft genannte Reaktorkonzepte sind neben der Drehrohrtechnologie der Herreshof Oven (*Multiple Hearth Furnace*), der Bewegtbettreaktor, verschiedene Reaktoren auf Wirbelschichtbasis wie der Torbed Reaktor und der vor allem im Labormaßstab häufig eingesetzte Schneckenreaktor. Auch die Entwicklung eines Reaktors auf Basis eines Bandtrockners oder der Einsatz von Mikrowellentechnologie zur Beheizung der Biomasse werden diskutiert [41], [46]. Einen guten Überblick über verschiedene Reaktorkonzepte sowie deren Vor- und Nachteile liefern BATIDZIRAI et al. in [41].

Die von den meisten Firmen derzeit eingesetzte Technologie basiert auf der Drehrohrtechnik, die u. a. auch bei Drehrohrtrocknern, Drehrohröfen oder bei Kalzinatoren in Zementwerken zum Einsatz kommt. Die schematische Zeichnung eines Drehrohrreaktors zur Torrefizierung ist in Abbildung 3.9 dargestellt. Das Drehrohr wird als kontinuierlicher Reaktor mit wahlweise direkter oder indirekter Beheizung betrieben. Bei indirekter Beheizung besteht die Möglichkeit neben Rauchgasen auch andere Heizmedien wie Dampf oder Thermoöle einzusetzen. Der Reaktor ist gut über die eingestellte Heizmitteltemperatur sowie über verweilzeitbeeinflussende Größen wie Trommeldrehzahl und Aufstellwinkel regelbar. Die permanente Drehbewegung führt zu guter Durchmischung der Biomasse, damit zu einer gleichmäßigen Temperaturverteilung im Partikelbett und so zu homogenen Produkten. Der robuste und einfache Aufbau eines Drehrohrreaktors macht ihn weitgehend unempfindlich gegenüber Veränderungen der Partikelgröße und im Aufgabegut möglicherweise enthaltenen Fremdstoffen. Im Vergleich zu anderen Reaktorkonzepten sind die erreichbaren Wärmeübergangskoeffizienten niedrig. Zur Steigerung der übertragenen Wärmemenge können im Reaktorrinneren zusätzliche Heizrohre installiert und die wärmeübertragende Fläche dadurch vergrößert werden. Durch Reibung der Partikel aneinander und an der Reaktorwand kann es zu vermehrter Bildung von Feinanteilen kommen. Insgesamt ist die Drehrohrtechnologie als einfache, robuste und bewährte Technologie zu bezeichnen [41], [46], [70]. Aufgrund der genannten

Eigenschaften wird in der vorliegenden Arbeit das Modell eines Torrefizierungsreaktors auf Basis der Drehrohrtechnologie erstellt.

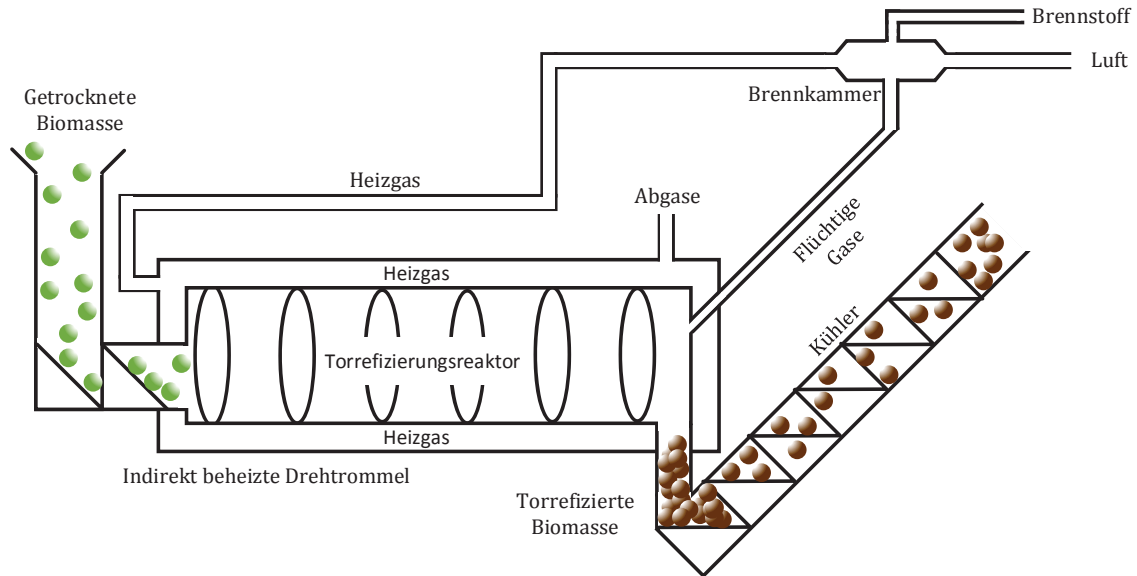


Abbildung 3.9: Schematische Abbildung eines Drehrohrreaktors nach [70]; die Beheizung erfolgt indirekt mittels heißer Rauchgase

Für weiterführende Informationen zu den Grundlagen der Torrefizierung sei an dieser Stelle auf die Veröffentlichungen von CHEN et al. [8], BATIDZIRAI et al. [41], BASU [70], BERGMAN et al. [55] und CHEW und DOSHI [96] verwiesen.



4 BETRACHTETE SZENARIEN UND KENNZAHLEN

Die Mitverbrennung von Biomasse wird anhand der Betrachtung verschiedener Prozessvarianten untersucht. Im Folgenden werden die zur Betrachtung ausgewählten Varianten vorgestellt und mit einer Kurzbezeichnung versehen, um eine eindeutige Zuordnung der Modelle in Kapitel 5 und der Ergebnisse in Kapitel 6 zu ermöglichen. Anschließend erfolgt die Definition der energetischen Effizienz, die in Kapitel 6 als Kennzahl zur Bewertung der verschiedenen Varianten herangezogen wird.

4.1 Betrachtete Szenarien

Neben integrierten Varianten, bei denen die Vorbehandlung durch die Nutzung thermischer Energie aus dem Kraftwerksprozess erfolgt, werden auch Varianten mit einer von einem Kraftwerksprozess unabhängigen Vorbehandlung untersucht.

In Abbildung 4.1 sind alle zur Untersuchung ausgewählten Varianten dargestellt, bei denen die Vorbehandlung der Biomasse unabhängig vom Kraftwerksprozess erfolgt. Die Vorbehandlung findet in diesen Fällen am Ort des Biomasseanfalls in Nordamerika statt und der erzeugte Biobrennstoff wird anschließend nach Europa transportiert. Daher werden diese Varianten als Importvarianten bezeichnet. Die zur Vorbehandlung notwendige thermische Energie wird bei diesen Varianten durch die Verbrennung zusätzlicher Rohbiomasse erzeugt. Die notwendige elektrische Energie wird dem Stromnetz am Ort der Vorbehandlung entnommen und bei der Berechnung der energetischen Effizienz berücksichtigt.

Die drei Importvarianten lassen sich anhand des Torrefizierungsgrades unterscheiden. Bei Variante Import_AWL0 wird die Biomasse vor dem Transport zum Kraftwerk getrocknet und pelletiert, eine Torrefizierung findet nicht statt. Bei den Varianten Import_AWL15 und Import_AWL30 wird die Biomasse getrocknet, torrefiziert und pelletiert. Diese beiden Varianten unterscheiden sich im Torrefizierungsgrad der vorbehandelten Biomasse, der in der Kurzbezeichnung mit der Abkürzung AWL und der darauf folgenden Zahl kenntlich gemacht wird. Demnach wird bei der Variante Import_AWL15 bis zu einem Torrefizierungsgrad von 15% torrefiziert, bei der Variante Import_AWL30 wird ein Torrefizierungsgrad von 30% erreicht. Nach der Vorbehandlung erfolgen bei allen Importvarianten der Transport zum Kraftwerk und die Mitverbrennung.

Die zur Untersuchung ausgewählten Varianten mit der in den Kraftwerksprozess integrierten Vorbehandlung werden als integrierte Varianten bezeichnet und sind in Abbildung 4.2 dargestellt. Bei diesen Varianten findet die Vorbehandlung am Kraftwerksstandort statt. Die zur Vorbehandlung notwendige thermische und elektrische Energie wird durch den Kraftwerksprozess bereitgestellt. Die Beheizung der Trocknung erfolgt bei allen Varianten mit Anzapfdampf aus der MD-/ND-Überströmleitung. Unterschiede zwischen den Varianten ergeben sich bei der Beheizung des Torrefizierungsreaktors.

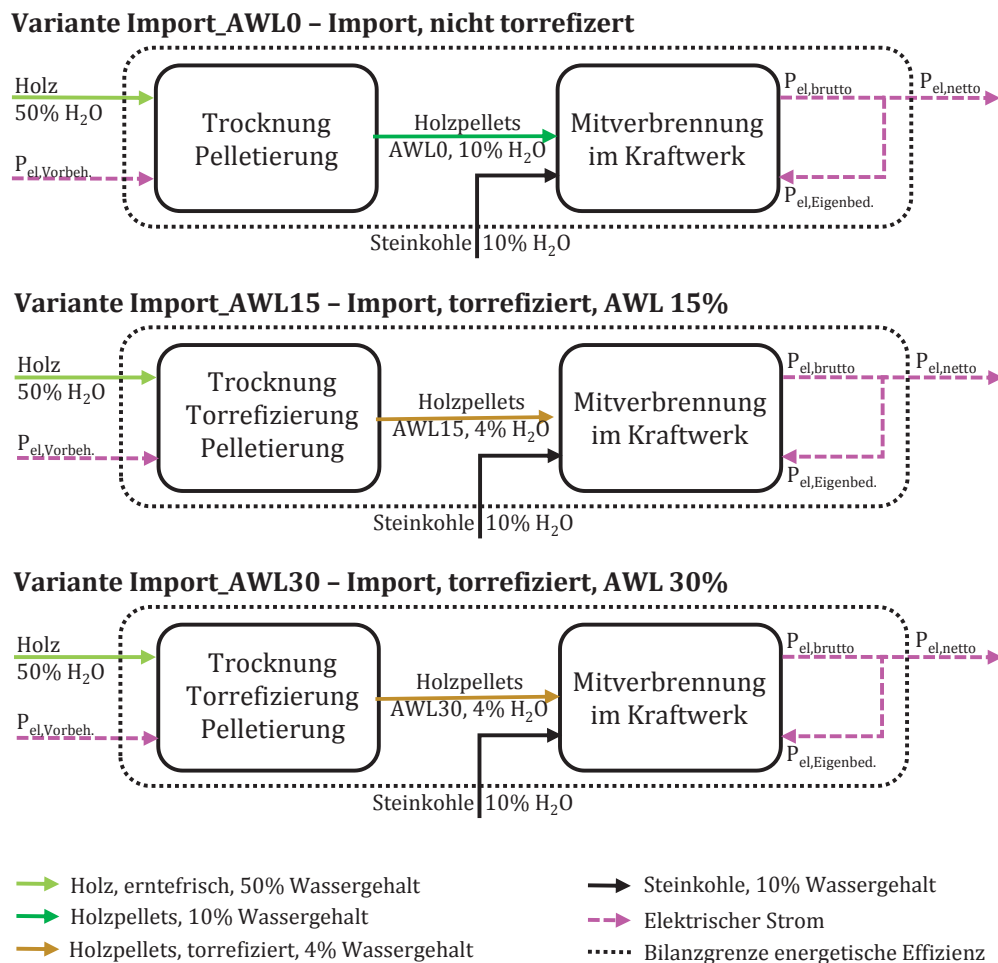
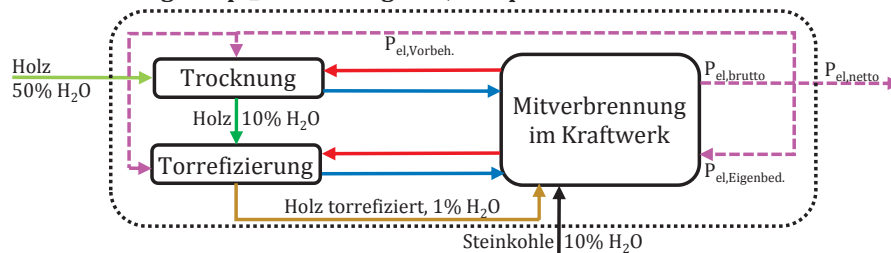


Abbildung 4.1: Vereinfachte Darstellung der untersuchten Varianten mit Vorbehandlung der Biomasse unabhängig vom Kraftwerksprozess

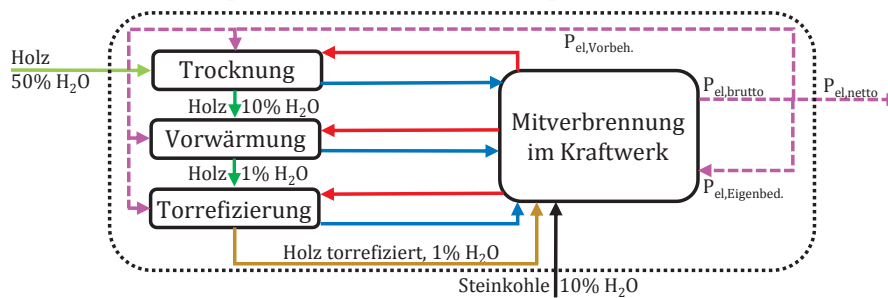
Die Kurzbezeichnungen sind bei den integrierten Varianten analog zu den Kurzbezeichnungen bei den Importvarianten aufgebaut. Da bei den integrierten

Varianten erst in Kapitel 6 optimale Torrefizierungsgrade mit maximierter Leistung und Effizienz identifiziert werden, wird in Abbildung 4.2 noch kein Torrefizierungsgrad genannt. Die Kurzbezeichnungen der Varianten enden deshalb mit der Abkürzung AWL und somit ohne Angabe eines Torrefizierungsgrads. Diese Angabe wird in Kapitel 6 ergänzt.

Variante IntegDampf_AWL – Integriert, dampfbeheizt



Variante IntegDampfVW_AWL – Integriert, dampfbeheizt, mit zus. Holzvorwärmung



Variante IntegRG_AWL – Integriert, rauchgasbeheizt

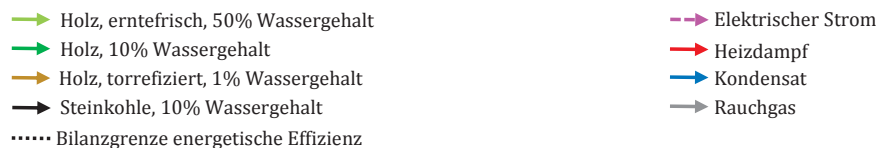
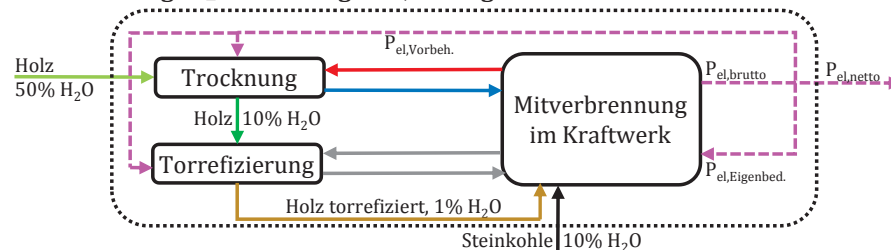


Abbildung 4.2: Vereinfachte Darstellung der untersuchten Varianten mit in den Kraftwerksprozess integrierter Vorbehandlung der Biomasse

Bei Variante IntegDampf_AWL wird der Torrefizierungsreaktor mit Frischdampf aus dem Kraftwerksprozess beheizt. Die Variante IntegDampfVW_AWL stellt eine Erweiterung der dampfbeheizten Variante IntegDampf_AWL dar. Zwischen Trocknung und Torrefizierung ist ein zusätzlicher Holzvorwärmer vorgesehen, der mit Anzapfdampf aus der Zwischenüberhitzung des Kraftwerksprozesses beheizt wird. Der Torrefizierungsreaktor kann alternativ zur Beheizung mit Anzapfdampf auch mit heißen Rauchgasen beheizt werden. Die rauchgasbeheizte Variante wird mit der Kurzbezeichnung IntegRG_AWL gekennzeichnet.

4.2 Energetische Effizienz

Die Bewertung der vorgestellten Varianten erfolgt in Kapitel 6 anhand der energetischen Effizienz und der spezifischen CO₂-Emissionen. Die zur Berechnung der energetischen Effizienz angewendeten Bilanzgrenzen sind in Abbildung 4.1 und Abbildung 4.2 dargestellt. Entsprechend wird die energetische Effizienz bei allen Varianten nach Gleichung 3 berechnet.

$$\eta_{gesamt} = \frac{P_{el,brutto} - P_{el,Vorbeh.} - P_{el,Eigenbed.}}{\dot{m}_{H,50\%H_2O} \cdot H_{u,H,50\%H_2O} + \dot{m}_{SK} \cdot H_{u,SK} + \dot{Q}_{L,BM,SK}} \quad (3)$$

Die sensiblen Wärmen der beiden Brennstoffe sowie der Verbrennungsluft werden in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 3986 zur Ermittlung des Wirkungsgrades von konventionellen Kraftwerken auf eine Bezugstemperatur von 15 °C bezogen. In Gleichung 3 werden diese sensiblen Wärmen mit dem Parameter $\dot{Q}_{L,BM,SK}$ zusammengefasst und berücksichtigt.



5 MODELLBILDUNG

Die Erstellung der Modelle erfolgt unter Verwendung der kommerziellen Simulationssoftware Epsilon®*Professional*. Die Software ist zur Simulation stationärer Betriebspunkte energietechnischer Anlagen entwickelt worden. Eine Vielzahl der in der Kraftwerkstechnik eingesetzten Einzelkomponenten wird in Form einer Bauteilbibliothek bereitgestellt. Darüber hinaus bietet Epsilon®*Professional* die Möglichkeit, durch Kernel Scripting eigene Bauteile, wie z. B. Trockner oder Torrefizierungsreaktoren, zu modellieren und als Einzelkomponente oder als Teil eines Gesamtmodells bei Simulationsrechnungen einzusetzen.

Im Simulationsprogramm sind Stoffwertemodelle hinterlegt. Dabei handelt es sich im Wesentlichen um IAPWS-IF97 (*International Association for the Properties of Water and Steam*) für die Wasser-/Dampfseite und um die Formeln des FDBR (Fachverband Dampfkessel-, Behälter- und Rohrleitungsbau) für die Berechnung der Rauchgasseite.

5.1 Kraftwerk

Ein Vorteil der Mitverbrennung von Biomasse gegenüber der Nutzung von Biomasse in Kraftwerken, die ausschließlich Biomasse als Brennstoff verwenden, ist die Möglichkeit, auf den bereits bestehenden Kraftwerkspark zurückzugreifen und dadurch die Investitionskosten niedrig zu halten. Aus diesem Grund werden die Simulationsrechnungen in der vorliegenden Arbeit auf Basis eines bestehenden Steinkohlekraftwerks durchgeführt.

Um ein für den Standort Deutschland möglichst repräsentatives Kraftwerk zu betrachten, wurde eine Mitte der 1970er Jahre in Betrieb genommene Anlage ausgewählt, deren Alter nahe am Durchschnittsalter des deutschen Steinkohlekraftwerksparks von derzeit 37 Jahren [97] liegt. Die verkehrstechnisch günstige Lage des Kraftwerksblocks in unmittelbarer Nähe zu einem internationalen Seehafen ist vor allem für die Betrachtung von Importszenarien von Vorteil. Zudem ist die Bereitschaft des Betreibers, die zur Modellierung des Kraftwerksprozesses notwendigen Betriebsdaten zur Verfügung zu stellen, als weiterer Auswahlgrund zu nennen.

5.1.1 Gesamtprozess

Ein vereinfachtes Prozessschaltbild der Kraftwerksanlage ist in Abbildung 5.1 dargestellt. Die Modellierung des Gesamtprozesses erfolgt im Vollastbetriebspunkt auf Basis validierter Betriebsdaten. Die wichtigsten Kenngrößen und Betriebsparameter der Anlage sind in Tabelle 5.1 aufgelistet.

Tabelle 5.1: Charakteristika des Kraftwerksmodells

Nettoleistung	763 MW _{el}
Bruttoleistung	827 MW _{el}
Nettowirkungsgrad	39,6%
Bruttowirkungsgrad	42,9%
Frischdampf Temperatur	530 °C
Frischdampfdruck	190 bar
HZÜ-Temperatur	535 °C
HZÜ-Druck	39,1 bar
Kondensatordruck	60/87 mbar

Im Vergleich zu anderen Anlagen mit ähnlichem Alter weist die Anlage verschiedene Besonderheiten auf. Die direkte Lage an der Nordseeküste ermöglicht den Einsatz einer Frischwasserkühlung mit Seewasser und damit potentiell niedrige Kondensatordrücke, ein Kühlturm ist nicht erforderlich. Zusätzlich zum ursprünglich installierten Turbosatz, bestehend aus jeweils einer Hochdruck-, Mitteldruck- und Niederdruckturbine, wurde eine als Zweigturbine bezeichnete zweite Niederdruckturbine nachgerüstet. Diese Anpassung wurde aufgrund der begrenzten Schluckfähigkeit des ND-Teils der Hauptturbine bei Maßnahmen zur Leistungssteigerung notwendig. Etwa 40% des Dampfmassenstroms in der MD/ND-Überströmleitung werden in die Zweigturbine geleitet. Auf der Luftseite der Anlage wurde zwischen Luftvorwärmung und Kohlemühle ein Mühlenluftgebläse installiert und dadurch der Einsatz eines regenerativen Bisektor-Luftvorwärmers ermöglicht.

5.1.2 Dampferzeuger

Zusätzlich zum Gesamtprozess wurde ein detailliertes Modell des Dampferzeugers erstellt. Die Modellierung erfolgt auf Basis validierter Betriebsdaten sowie der Geometrie des gesamten Dampferzeugers und aller relevanten Einzelheizflächen. Es wird angenommen, dass die Feuerraumendtemperatur auch bei der

Mitverbrennung von Biomasse konstant bleibt. Für detaillierte Informationen zum Modell des Dampferzeugers wird auf die Arbeit von EVERTS [98] verwiesen.

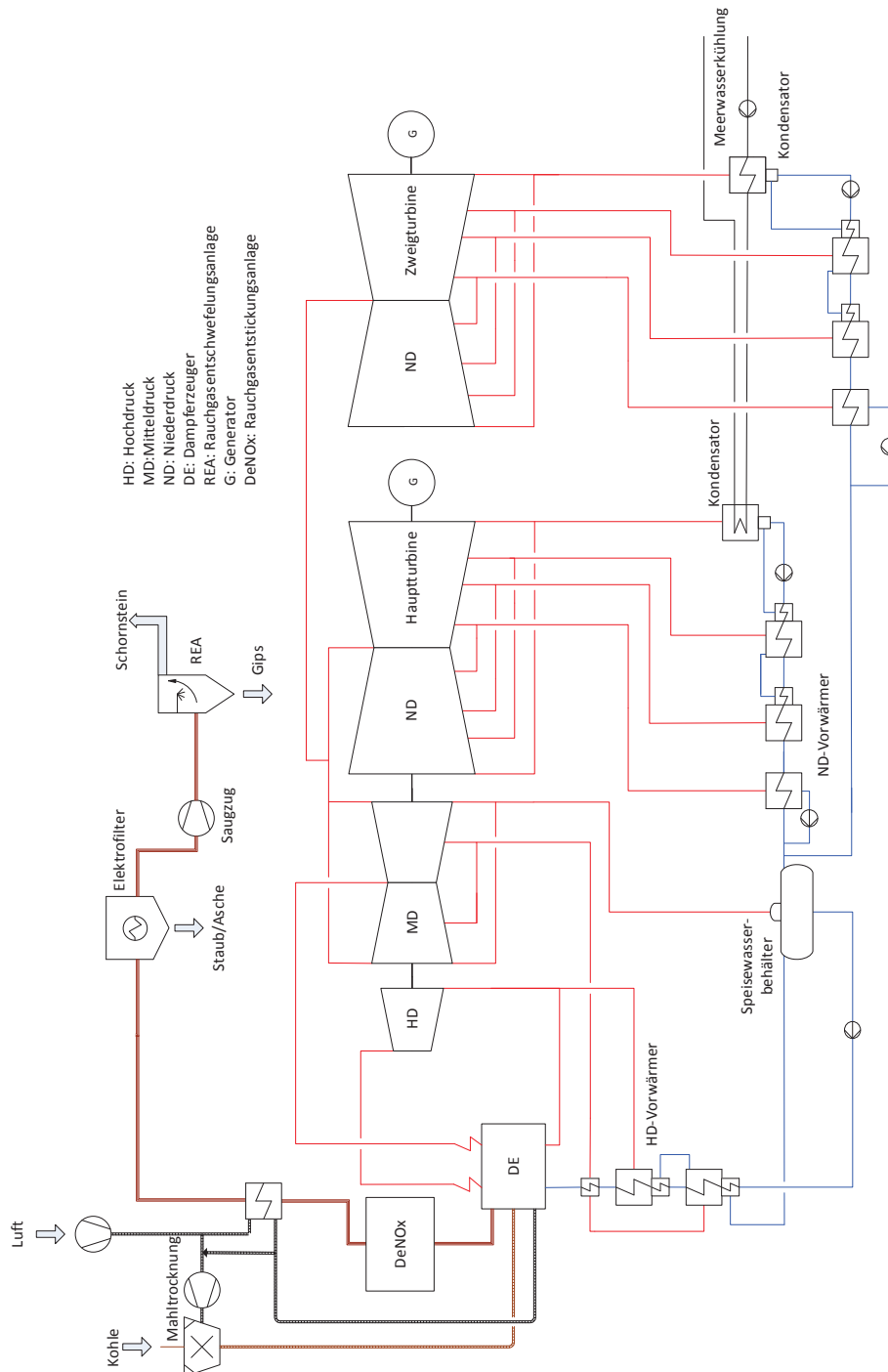


Abbildung 5.1: Vereinfachtes Prozessschaltbild des modellierten Dampfkraftwerks

5.2 Mühlen

Bevor die Verbrennung im Dampferzeuger erfolgen kann, sind verschiedene Varianten der Feinmahlung von Biomasse denkbar, vgl. Kapitel 2. Beim Einsatz torrefizierter Biomasse erscheint neben der Verwendung von Hammermühlen auch eine Mitvermahlung in den zur Mahlung von Kohle installierten Walzenschüsselmühlen oder die Umstellung einzelner Walzenschüsselmühlen auf den Betrieb mit 100 % torrefizierter Biomasse möglich. Für beide Ansätze sind jedoch kaum Erfahrungen und Messdaten verfügbar, eine Modellierung ist deshalb nicht sinnvoll. Aus diesem Grund erfolgt die Mahlung der Biomasse in der vorliegenden Arbeit ausschließlich mit Hammermühlen, unabhängig davon ob der Einsatz von Holzhackschnitzeln, Holzpellets oder torrefizierter Biomasse untersucht wird. Dadurch wird in jedem Fall die Installation zusätzlicher Mühlen notwendig. Eine Leistungsreduktion der Anlage im Vollastbetrieb aufgrund limitierter Mühlenkapazitäten kann ausgeschlossen werden. Zudem können die Untersuchungsergebnisse beim konsequenten Einsatz von Hammermühlen besser miteinander verglichen werden als beim Einsatz unterschiedlicher Mühlenkonzepte. Zur Mahlung des je nach Mitverbrennungsrate erforderlichen Kohleanteils kommen die am Standort vorhandenen Walzenschüsselmühlen mit unveränderten Betriebsparametern zum Einsatz.

Hammermühle

Hammermühlen sind aus einer innerhalb des Mühlengehäuses horizontal angeordneten, rotierenden Achse aufgebaut, an der in regelmäßigen Abständen Schlagwerkzeuge (sog. Hammer) beweglich angebracht sind. Bei Aufgabe von Mahlgut erfolgt durch die Krafteinwirkung der umlaufenden Schlagwerkzeuge eine Prallbelastung auf das zu mahlende Gut und es kommt zum Bruch und zur Zerkleinerung. Ein Teil des Mühlengehäuses ist als Lochblech mit Austrittsöffnungen in definierter Größe ausgeführt und dient als Sieb. Durch die Mahlwirkung ausreichend zerkleinerte Partikel passieren dieses Sieb und verlassen die Mühle. Partikel, die noch zu groß zum Durchtritt durch das Siebblech sind, verbleiben zur weiteren Zerkleinerung innerhalb der Mühle. Eine schematische Zeichnung einer Hammermühle ist in Abbildung 5.2 dargestellt.

Zum Betrieb einer Hammermühle ist neben dem elektrischen Antrieb der Mühle zur Bereitstellung der Mahlleistung in der Regel die Beaufschlagung der Mühle mit Luft

notwendig, um die zerkleinerte Biomasse durch das Sieb der Mühle auszutragen. Im Modell werden nach [99] für eine Hammermühle notwendige Traggasverhältnisse von $380 \text{ l}_L/\text{kg}_{\text{BM}}$ und ein Druckverlust der Mühle von 30 mbar angesetzt. Die verwendete Luft wird nach [29] mit einer maximalen Temperatur von 110°C bereitgestellt. Im Folgenden werden Gleichungen zur Berechnung der elektrischen Leistungsaufnahme der Hammermühle für die untersuchten Holzbrennstoffe vorgestellt.

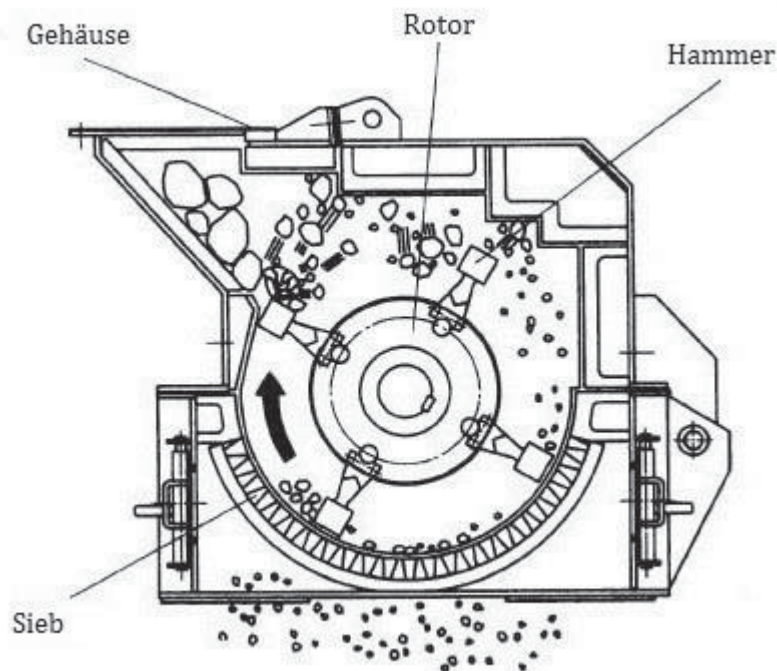


Abbildung 5.2: Schematische Zeichnung einer Hammermühle aus [100]

Leistungsaufnahme bei der Mahlung nicht torrefizierter Biomasse

TEMMERMAN et al. haben in [101] ein Modell zur Berechnung der elektrischen Leistungsaufnahme einer Hammermühle bei der Mahlung von Holzhackschnitzeln und Holzpellets durch Anwendung der Von-Rittinger-Mühlentheorie vorgeschlagen. Es werden drei Haupteinflussgrößen genannt und im Modell berücksichtigt:

- Materialart bzw. Holzart
- Partikelgrößendifferenz zwischen Aufgabegut und gemahlenem Produkt
- Wassergehalt der Biomasse

Die für Holzhackschnitzel entwickelte Berechnungsgleichung erfasst alle genannten Parameter und wurde auf Basis systematischer Mahlversuche durch Variation der Start- und Zielpartikelgröße für verschiedene Kombinationen aus Holzart und Wassergehalt erstellt:

$$P_{el,1-2} = M \cdot H \cdot \left(\frac{1}{x_2} - \frac{1}{x_1} \right) \left[\frac{Wh}{kg} \right] \quad (4)$$

Der Faktor M beschreibt die Mahlbarkeit einer Holzart, H den Wassergehalt der Biomasse in gew.-%, x_1 die maximale Korngröße des Aufgabeguts in mm und x_2 die Größe der Durchtrittsöffnung des Mühlensiebs in mm. Für M wird der Wert für Eichenholz mit 8,54 verwendet [57]. Damit werden die Mahleigenschaften eines typischen Vertreters der Kategorie Laubholz berücksichtigt und es wird ein im Vergleich zu anderen Holzarten durchschnittlicher und damit möglichst universell gültiger Wert verwendet. Weitere Informationen zur Auswahl der betrachteten Holzart folgen in Kapitel 5.8.

Leistungsaufnahme bei der Mahlung von Holzpellets

Bei der Mahlung von Holzpellets findet zunächst eine Auflösung der Pellets in die vor der Pelletierung vorliegende Korngrößenverteilung statt. Bei darüber hinausgehender Zerkleinerung kann nach [101] ebenfalls von der Anwendbarkeit der Von-Rittinger-Mühlentheorie ausgegangen werden. Zur Berechnung des Mahlaufwands von Holzpellets wird Gleichung 5 vorgeschlagen.

$$P_{el,1-2} = \left[a \left(\frac{1}{x_2} - \frac{1}{x_1} \right) + b \right] + P_0 \left[\frac{Wh}{kg} \right] \quad (5)$$

Der Parameter P_0 entspricht der elektrischen Energie, die notwendig ist, um die Pellets in die ursprünglichen Einzelpartikel aufzulösen. Er wird von TEMMERMAN et al. mit 2,5 Wh/kg berechnet. Die Parameter a und b ergeben sich nach Regressionsrechnungen auf Basis systematisch durchgeführter Mahlversuche, für a ergibt sich der Wert 17,36 und für b der Wert -2,40.

Leistungsaufnahme bei der Mahlung torrefizierter Biomasse

BRIDGEMAN et al. [102] schlagen zur Ermittlung der Mahlbarkeit torrefizierter Biomasse die Bestimmung des Mahlkennwerts HGI (*Hardgrove Grindability Index*) vor. Dazu wird die bekannte Methode zur Bestimmung des HGI für Steinkohlen nach

ISO 5074 zur Anwendung auf torrefizierte Biomasse angepasst. Abweichend von der genormten Bestimmungsmethode wird dazu keine definierte Masse sondern ein definiertes Volumen der jeweiligen Brennstoffprobe zur Analyse eingesetzt. Durch Anwendung der angepassten Methode auf Steinkohlen mit bekanntem HGI wird die Messmethode kalibriert. Die Ergebnisse dieser Messmethode bei der Analyse unterschiedlich intensiv torrefizierter Holzproben deuten auf ein annähernd lineares Verhalten zwischen HGI und AWL hin, der Zusammenhang kann mit der folgenden empirischen Gleichung beschrieben werden:

$$HGI = 171,6 \cdot AWL - 6,0767 \quad (6)$$

Da der HGI zur Beschreibung der Mahlbarkeit roher oder nur sehr leicht torrefizierter Biomassen nicht geeignet ist, gilt für Gleichung 6 ein Gültigkeitsbereich von $AWL = 6,4$ bis $AWL = 30$.

Der HGI ist ein Maß für die Härte beim Mahlen eines Festbrennstoffs. Er liefert aber keine konkreten Informationen zum Energieaufwand bei der Mahlung und muss deshalb durch den Ansatz einer Mühentheorie ergänzt werden. BATES [60] wählt dazu den Ansatz nach BOND [103], der in Gleichung 7 dargestellt ist und als Parameter den BWI (*Bond Working Index*) enthält:

$$P_{el,1-2} = 10 \cdot BWI \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{x_2}} - \frac{1}{\sqrt{x_1}} \right) \left[\frac{Wh}{kg} \right] \quad (7)$$

Zur Verknüpfung von HGI und BWI werden in der Literatur Gleichungen nach folgendem Muster vorgeschlagen:

$$BWI = a \cdot HGI^b \quad (8)$$

BOND [104], [105] und andere Autoren wie McINTYRE und PLITT [106] machen Vorschläge für die Parameter a und b. BATES [60] wählt daraus den Vorschlag von McINTYRE und PLITT aus ($a = 1622$; $b = -1,08$) und kommt damit bei intensiv torrefizierten Biomassen auf vergleichbare Werte für den BWI wie bei Steinkohlen. Die Kombination der Gleichungen 6, 7 und 8 führt zu Gleichung 9, die im Modell zur Berechnung des Leistungsbedarfs der Hammermühle bei der Mahlung torrefizierter Biomasse verwendet wird. Dabei muss der Wert für den Torrefizierungsgrad AWL in % eingesetzt werden.

$$P_{el,1-2} = 10 \cdot a \cdot (171,6 \cdot AWL - 6,0767)^b \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{x_2}} - \frac{1}{\sqrt{x_1}} \right) \left[\frac{Wh}{kg} \right] \quad (9)$$

5.3 Trockner

Aufgrund der einfachen, robusten Bauweise und der Unempfindlichkeit gegenüber Veränderungen bei der Partikelgrößenverteilung und gegenüber Störstoffen werden die verwendeten Trocknermodelle auf Basis der Drehrohrtechnologie modelliert. Die Modellierung erfolgt anhand von Energie- und Massenbilanzen. Die Energiebilanz berücksichtigt die Verdampfungsenthalpie des ausgetriebenen Wassers, die Bindungsenthalpie von Wasser in Holz nach KOLLMANN [107] sowie Strahlungsverluste über die Trockneroberfläche, die nach KONIDIS [108] abgeschätzt werden. Zudem erfolgt eine vereinfachte geometrische Auslegung durch die Abschätzung von Wärmeübergangskoeffizienten.

Dampfbeheizter Trockner

Bei den untersuchten Varianten mit integrierter Trocknung am Kraftwerksstandort kommt ein indirekt mit Anzapfdampf beheizter Trockner zum Einsatz. Die Wärmeübertragung an das Trocknungsgut erfolgt durch die doppelwandig ausgeführte Außenwand des Trockners und über im Inneren verlaufende Rohre, die sich mit dem Trockner drehen. Eine beispielhafte Zeichnung des dampfbeheizten Trockners ist in Abbildung 5.3 dargestellt.

Auf Basis von Informationen eines Herstellers von Drehrohr Trocknern [109] und in Anlehnung an [110] wird für den Wärmeübergangskoeffizienten von den Heizflächen zur Biomasseschüttung ein Wert von $200 \frac{W}{m^2K}$ angenommen. Der dampfseitige Wärmeübergangskoeffizient wird mit $5000 \frac{W}{m^2K}$ und die Wärmeleitfähigkeit des verwendeten Stahls mit $50 \frac{W}{mK}$ abgeschätzt. Der Wärmedurchgangskoeffizient wird dann unter Verwendung der Formel für den Wärmedurchgang durch Rohrwände nach [110] bestimmt. Durch Festlegung der sonstigen Trocknergeometrie kann damit die notwendige Trocknerlänge bestimmt werden. Um die im Trocknungsprozess ausgetriebenen Brüden aus dem Trockner zu entfernen, wird der Trockner mit Luft gespült. Dabei wird der Luftmassenstrom so geregelt, dass am Austritt eine Differenz von 10 K zur Taupunkttemperatur eingehalten wird.

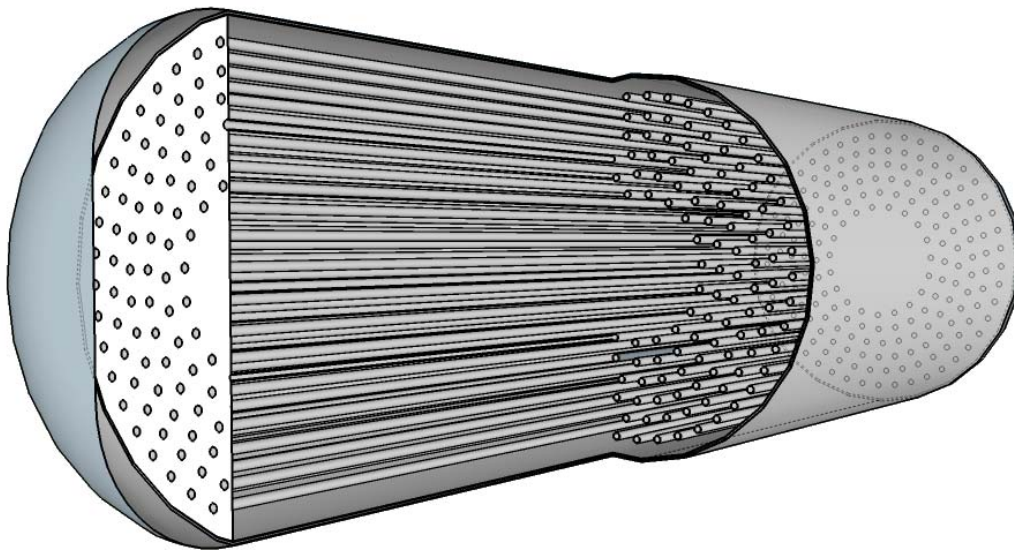


Abbildung 5.3: Vereinfachte Schnittzeichnung des dampfbeheizten Trockners; der Einströmbereich des Heizdampfs, die Biomasseaufgabe sowie die Dreheinrichtung und weitere Nebenaggregate sind nicht abgebildet; Länge = 25 m, Durchmesser = 5 m

Rauchgasbeheizter Trockner

Bei den Modellvarianten mit Vorbehandlung der Biomasse am Ort des Biomasseanfalls und damit unabhängig vom Kraftwerksprozess ist kein Dampf zur Beheizung des Trockners verfügbar. Die Beheizung findet deshalb im direkten Kontakt mit heißen Rauchgasen statt. Das Drehrohr wird dann einwandig ausgeführt, und die Heizrohre im Inneren fallen weg. Die Berechnung des volumenbezogenen Wärmeübergangskoeffizienten vom Rauchgas auf die Holzpartikel erfolgt nach Gleichung 10 [111].

$$\alpha = K \cdot f(\varphi) \cdot G^c \cdot d^d \left[\frac{W}{m^3 K} \right] \quad (10)$$

Dabei steht G für den flächenbezogenen Heizgasmassenstrom in $\frac{kg}{m^2 s}$, d für den Durchmesser des Drehrohrs in m. $f(\varphi)$ ist eine Funktion zur Berücksichtigung von Stoffparametern, evtl. verbauter Mischbleche und der Rotationsgeschwindigkeit des Drehrohrs. Die Parameter K , c und d sind empirisch ermittelte Konstanten. In [111] werden Vorschläge verschiedener Autoren für die Parameter $f(\varphi)$, K , c und d diskutiert. Zur Verwendung im Modell werden die von McCORMICK vorgeschlagenen Werte ausgewählt, die im Vergleich zu den Ergebnissen auf Basis

der Werte der meisten anderen Autoren vergleichbare Resultate liefern. Mit Hilfe des volumenbezogenen Wärmübergangskoeffizienten kann bei festgelegtem Trocknerdurchmesser und bekanntem Holzmassenstrom die erforderliche Länge des Trockners abgeschätzt werden.

Beim direkt mit Rauchgasen beheizten Trockner ist zudem die Installation eines Zyklons zur Abscheidung eventuell mitgeführter Holzpartikel notwendig. Im Modell wird der Zyklon vereinfacht mit einem Druckverlust von 20 mbar abgeschätzt. Der elektrische Energiebedarf zur Trommeldrehung wird für beide Varianten mit einer empirischen Formel aus [112] als Funktion geometrischer Parameter, der Masse des Trockners sowie des im Trockner befindlichen Trocknungsguts und der Drehgeschwindigkeit des Drehrohrs berechnet.

Für detaillierte Informationen zu den verwendeten Trocknermodellen wird auf die Arbeit von EVERTS [98] verwiesen.

5.4 Torrefizierungsreaktor

Entsprechend den erläuterten Eigenschaften und Vorteilen der Drehrohrtechnologie wird neben den Trocknern auch der Torrefizierungsreaktor als Drehrohr modelliert. Aufgrund der guten Durchmischung der Biomasse im Drehrohrreaktor kann in guter Näherung von einer ideal durchmischten Biomasseschüttung ausgegangen werden. Temperaturgradienten in radialer Richtung zur Reaktorachse werden vernachlässigt. Das Reaktormodell wird entsprechend als eindimensionales Modell ausgeführt, dazu wird der Reaktor in diskrete Volumenelemente mit der Länge dx unterteilt, siehe Abbildung 5.4.

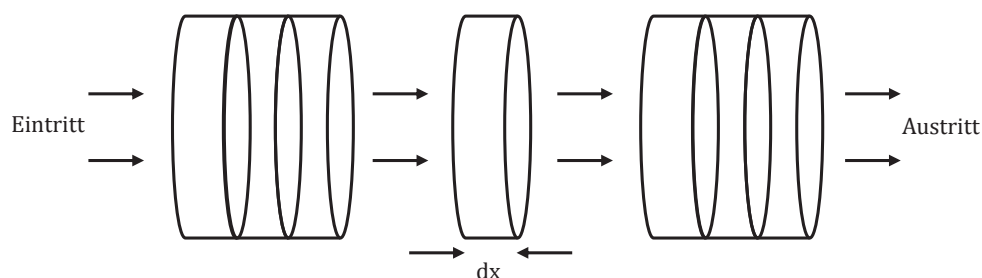


Abbildung 5.4: Einteilung des Reaktors in Volumenelemente mit der Länge dx

Die im Folgenden vorgestellten Berechnungsmodelle und Gleichungen werden zunächst auf Basis der Eintrittsparameter für das erste Volumenelement gelöst, und

die Ergebnisse an das darauf folgende Volumenelement übergeben usw. Nach Durchlaufen aller, je nach Reaktorlänge benötigten Volumenelemente wird die Rechnung beendet. Die Werte des zuletzt berechneten Volumenelements stellen die Ergebnisse am Reaktoraustritt dar.

Das verwendete Berechnungsmodell besteht aus zwei Teilmodellen, einem Reaktormodell und einem thermochemischen Modell, vgl. Abbildung 5.5. Im Reaktormodell wird zunächst auf Basis verschiedener Vorgabewerte der Wärmedurchgang vom Heizmedium zur Biomasse und die daraus resultierende Aufheizung der Biomasse im entsprechenden Volumenelement berechnet. Die ermittelte Temperatur der Biomasse wird dem thermochemischen Modell übergeben. Zusammen mit den vorgegebenen Stoffwerten und kinetischen Parametern kann damit die eigentliche Torrefizierungsreaktion berechnet werden. Ergebnisse des thermochemischen Modells sind die elementare Zusammensetzung der festen und gasförmigen Produkte, deren Heizwerte und der Torrefizierungsgrad.

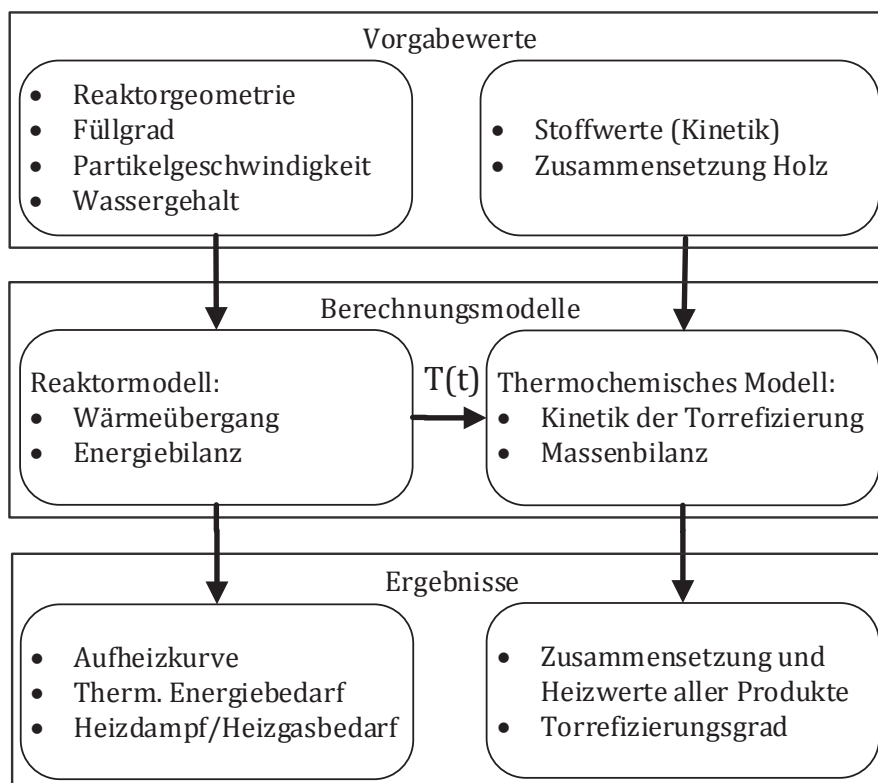


Abbildung 5.5: Aufbau des Modells zur Berechnung der Torrefizierungsreaktoren

Im Folgenden werden die beiden Teilmodelle sowie die jeweils wichtigsten zur Berechnung verwendeten Gleichungen erläutert.

5.4.1 Reaktormodell

Geometrie des Reaktors

Der Torrefizierungsreaktor wird hinsichtlich der Wärmebereitstellung in zwei Varianten modelliert: Beheizt durch Heizdampf und beheizt durch heiße Rauchgase. Der dampfbeheizte Torrefizierungsreaktor wird als indirekt beheizter Reaktor ausgeführt. Der notwendige Heizdampf strömt sowohl durch die doppelwandig ausgeführte Reaktorschale sowie durch im Inneren des Reaktors verlaufende Heizdampfrohre und gibt dabei thermische Energie durch Kondensation ab. Um eine Vermischung der entstehenden Torrefizierungsgase mit dem Heizgasmassenstrom zu vermeiden, wird, anders als beim rauchgasbeheizten Trockner, auch beim rauchgasbeheizten Torrefizierungsreaktor von indirekter Beheizung ausgegangen. Die nötige Anzahl an Heizrohren im Inneren des Reaktors fällt aufgrund deutlich geringerer Wärmedurchgangswerte bei der Beheizung mit Rauchgasen im Vergleich zur Beheizung mit Dampf größer aus. Wichtige Parameter und Annahmen bezüglich der geometrischen Auslegung der Reaktoren sind in Tabelle 5.2 dargestellt.

Tabelle 5.2: Geometrische Parameter der Torrefizierungsreaktoren

Drehrohr		
Durchmesser		3 m
Länge		10 - 20 m
Heizrohre dampfbeheizt		
Anzahl		43
Durchmesser innen		9 cm
Durchmesser außen		10 cm
Heizrohre rauchgasbeheizt		
Anzahl		281
Durchmesser innen		6 cm
Durchmesser außen		5 cm

Die genannten Werte für den Durchmesser und die Länge eines Torrefizierungsreaktors liegen im Bereich typischer Werte für Drehrohranwendungen [112]. Die Wandergeschwindigkeit der Holzpartikel wird auf $0,008\bar{3} \frac{m}{s}$ festgelegt, und es wird ein Füllgrad des Reaktors von 50% angenommen. Dadurch ergibt sich ein Massenstrom von 5,61 kg/s trockener Biomasse in den Reaktor. Bei einer Verweilzeit der Biomasse im Reaktor von 30 min

wird eine typische Reaktorlänge von 15 m erreicht. Die tatsächlich erforderliche Länge eines Reaktors wird über die Vorgabe der Verweilzeit eingestellt. Sie richtet sich nach der jeweiligen Vorgabe des zu erreichenden Torrefizierungsgrads.

Die Wahl von Anzahl und Durchmesser der Heizrohre erfolgt mit dem Ziel, bei gegebener Reaktorlänge einen definierten Torrefizierungsgrad zu erreichen. Sie kann demnach erst nach Abschluss der Modellbildung erfolgen. Im vorliegenden Beispiel wird die Zahl der Heizrohre bei beiden Varianten so gewählt, dass bei einer typischen Reaktorlänge von 15 m ein typischer Torrefizierungsgrad von 15% erreicht wird. Zudem muss die Festlegung des Heizrohrdurchmessers bei der rauchgasbeheizten Variante als Kompromiss zwischen gutem Wärmeübergang zwischen Heizgas und Heizrohr und akzeptablem Druckverlust des Heizgases gewählt werden.

Die Anordnung der Heizrohre im Reaktor erfolgt im Modell durch die Vorgabe festgelegter Mindestabstände zwischen den einzelnen Rohren sowie zwischen den Rohren und der Reaktorwand. Im Bereich der Drehachse wird zudem ein Bereich mit mindestens 70 cm Durchmesser als möglicher Inspektionszugang frei gehalten und nicht mit Heizrohren versehen. Die Anordnung der Heizrohre im Reaktor ist beispielhaft für den dampfbeheizten Reaktor in Abbildung 5.6 dargestellt.

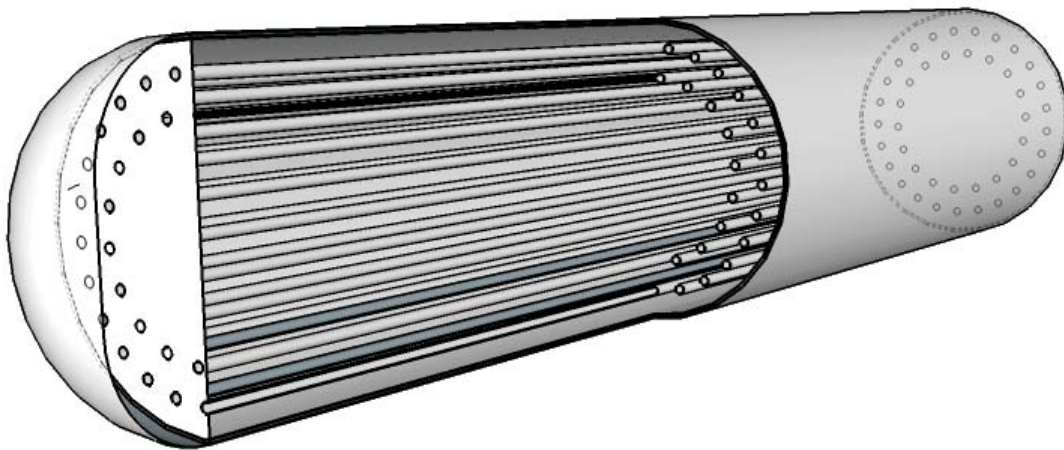


Abbildung 5.6: Vereinfachte Schnittzeichnung der dampfbeheizten Variante des Reaktormodells zur Veranschaulichung der Rohranordnung im Reaktor; der Einströmbereich des Heizdampfs, die Biomasseaufgabe sowie die Dreheinrichtung und weitere Nebenaggregate sind nicht abgebildet; Länge 15 m, Durchmesser 3 m

Berechnung des Wärmedurchgangs

Die Berechnung des Wärmedurchgangs vom Heizmedium auf die Biomasseschüttung erfolgt nach [110] unter Verwendung der Formeln für den Wärmedurchgangskoeffizienten durch eine Rohrwand. Im Fall des dampfbeheizten Reaktors wird wie beim dampfbeheizten Trockner als innerer Wärmeübergangskoeffizient der Dampfseite der Wert $5000 \frac{W}{m^2K}$ und für die Leitfähigkeit der Heizrohre der Wert für Stahl mit $50 \frac{W}{m}$ angenommen. Der Wärmeübergangskoeffizient auf der Seite der Biomasseschüttung wird wie beim Trocknermodell mit $200 \frac{W}{m^2K}$ abgeschätzt. Für den Wärmedurchgangskoeffizienten im dampfbeheizten Fall ergibt sich demnach ein Wert von knapp unter $200 \frac{W}{m^2K}$.

Analog dazu wird der Wärmedurchgang beim rauchgasbeheizten Reaktor berechnet, die genannten Werte für die Wärmeleitfähigkeit und den Wärmeübergangskoeffizienten auf der Biomasseseite bleiben unverändert. Der Wärmeübergang vom Heizgas auf das Heizrohr hängt von Strömungsgeschwindigkeit und Stoffeigenschaften des Heizgases sowie von der Geometrie und Oberflächenbeschaffenheit der Heizrohre ab und wird mit Gleichung 11 nach GNIELINSKI berechnet. Dabei stehen Re und Pr für die dimensionslosen strömungstechnischen Kennzahlen nach Reynolds und Prandtl, vgl. Gleichung 13 [110].

$$\alpha_i = \frac{Re \cdot Pr \cdot \zeta / 8}{1 + 12,7 \sqrt{\zeta / 8} (Pr^{2/3} - 1)} \left[1 + \left(\frac{d_i}{L} \right)^{2/3} \right] \cdot \left(\frac{\lambda_g}{d_i} \right) \left[\frac{W}{m^2K} \right] \quad (11)$$

L steht dabei für die Länge und d_i für den Durchmesser des durchströmten Rohrs in m , λ_g für die Leitfähigkeit des Rauchgases. Der Parameter ζ berechnet sich nach Gleichung 12.

$$\zeta = (1,8 \log_{10} Re - 1,5)^{-2} \quad (12)$$

Die Reynolds-Zahl ist abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit des Heizgases u_g , der kinematischen Viskosität des Heizgases ν_g und vom Innendurchmesser des Heizrohres d_i . Die Prandtl-Zahl wird aus der dynamischen Viskosität η_g , der spezifischen Wärmekapazität $c_{p,g}$ und der Wärmeleitfähigkeit λ_g des Heizgases berechnet.

$$Re = \frac{u_g \cdot d_i}{\nu_g} \quad Pr = \frac{\eta_g \cdot c_{p,g}}{\lambda_g} \quad (13)$$

Für den Wärmeübergangskoeffizienten auf der Heizgasseite ergeben sich damit je nach Heizrohrdurchmesser und Strömungsgeschwindigkeit Werte zwischen 30 und $70 \frac{W}{m^2K}$. Der Wert für den Wärmedurchgangskoeffizienten liegt knapp darunter und ist damit in jedem Fall deutlich niedriger als bei der dampfbeheizten Variante.

Berechnung des Druckverlusts

Beim rauchgasbeheizten Reaktor kann bei konstantem Heizgasmassenstrom durch eine Verkleinerung der Heizrohrdurchmesser die Heizgasgeschwindigkeit und damit auch die Reynolds-Zahl und der Wärmeübergang vom Heizgas zum Heizrohr erhöht werden. Gleichzeitig ergibt sich dadurch eine Erhöhung der Druckverluste. Die Wahl des Heizrohrdurchmessers stellt bei der rauchgasbeheizten Variante einen Kompromiss aus gutem Wärmeübergang und akzeptablem Druckverlust dar. Der Druckverlust wird nach Gleichung 14 berechnet [110].

$$\Delta p = \zeta_{dp} \cdot \frac{L}{d_i} \cdot \frac{\rho_g \cdot u_g^2}{2} \quad (14)$$

Dabei steht ρ_g für die Dichte des Heizgases. Der Druckverlustbeiwert ζ_{dp} wird nach [110] durch Gleichung 15 berechnet, wobei k für die absolute Rohrauigkeit in m steht und für Stahlrohre mit $0,1 \cdot 10^{-3}m$ abgeschätzt wird.

$$\zeta_{dp} = \frac{1}{\left(2 \lg \left(\frac{d_i}{k}\right) + 1,14\right)^2} \quad (15)$$

Spülgasstrom

Bei beiden Reaktorvarianten ist zusätzlich zur Beheizung ein möglichst inerter Spülgasstrom nötig, der im direkten Kontakt durch die Biomasseschüttung strömt, um die entstehenden Torrefizierungsgase aus dem Reaktor heraus zu transportieren. Der Druckverlust beim Durchströmen des Reaktors wird mit 15 mbar abgeschätzt. Als Spülgas kommen Rauchgase aus dem Kraftwerksprozess mit Sauerstoffgehalten um 3,6 gew.-%_{roh} zum Einsatz. Der Sauerstoffanteil im Spülgas widerspricht der Forderung nach inerter Reaktionsumgebung bei der Torrefizierung. Verschiedene Studien zeigen aber, dass geringe Sauerstoffgehalte unter 5% toleriert werden können oder sich durch Erhöhung des

Torrefizierungsgrads oder Verkürzung der nötigen Verweilzeiten ggf. sogar positiv auf die Torrefizierungsreaktionen auswirken können [113], [114], [115].

Energiebilanz

Durch die Torrefizierungsreaktion kann die Biomasse selbst Wärme in Form einer Reaktionsenthalpie freisetzen oder aufnehmen. In wenigen Studien werden Werte für die Reaktionsenthalpie bei Torrefizierungsprozessen genannt; die ermittelten Werte weichen teilweise stark voneinander ab. BERGMAN et al. [55] gehen insgesamt von eher endothermen Reaktionsbedingungen aus. Auch BATES [60] geht auf Basis gemessener Werte von PRINS [92] von endothermem Verhalten der Torrefizierungsreaktion aus. OHLINGER et al. [116] stellen hingegen bei Torrefizierungsversuchen mit Endtemperaturen zwischen 270 und 300 °C exothermes Verhalten fest. Bei vergleichbaren Temperaturen misst VAN DER STELT [117] sowohl stark exothermes als auch stark endothermes Verhalten. Die Ergebnisse der genannten Autoren sind in Tabelle 5.3 dargestellt.

Tabelle 5.3: Experimentell ermittelte Werte für die Reaktionsenthalpie der Torrefizierung

Reaktionsenthalpie kJ/kg	Messunsicherheit bzw. Bandbreite	Holzart	Messmethode	Autor
87	±449	Weide	Bombenkalorimetrie	PRINS [91]
150	±1350	Buche	Abschätzung durch Analyse der Edukte und Produkte	VAN DER STELT [113]
-25	±174	Buche	Abschätzung auf Basis experimenteller Werte	OHLINGER et al. [112]

Die Bestimmung von Reaktionsenthalpien der Torrefizierungsreaktion erfolgt durch messtechnische Bestimmung und Bilanzierung der Enthalpien von Ein- und Ausgangsströmen der verwendeten Analysegeräte und Reaktoren. Aufgrund großer Unsicherheiten bei den Messungen ist eine präzise Bestimmung schwierig [60]. Da die in Tabelle 5.3 aufgeführten Ergebnisse keinen klaren Trend zeigen – sowohl exothermes als auch endothermes Verhalten scheint möglich zu sein und die angegebenen Unsicherheiten und Bandbreiten sind groß –, wird auf die Berücksichtigung der Reaktionsenthalpie bei der Modellierung im Rahmen der vorliegenden Arbeit verzichtet. Die Reaktionsenthalpie wird mit 0 kJ/kg angenommen.

Die Bestimmung des zur Beheizung erforderlichen Heizgas- oder Heizdampfmassenstroms erfolgt auf Basis der Bilanzierung der entsprechenden Teilwärmemengen. Die zur Aufheizung der Biomasse sowie zur Aufheizung, Verdampfung und Überhitzung des enthaltenen Wassers nötige Energie wird für jedes Volumenelement berechnet. Die zusätzlich anfallenden Verluste und die durch das Spülgas eingebrachte Energie werden für den gesamten Reaktor abgeschätzt und zu gleichen Teilen auf alle Volumenelemente aufgeteilt.

Im ersten Teil des Reaktors findet neben der Aufwärmung des Holzes auch die Aufwärmung und Verdampfung des enthaltenen Wassers sowie die Überhitzung des entstehenden Dampfes statt. Die Berechnung erfolgt auf Basis von im Simulationsprogramm hinterlegten Stoffwerten. Dabei wird angenommen, dass das enthaltene Wasser im Temperaturbereich zwischen 80 und 120 °C vollständig in die Gasphase übergeht und die Biomasse während der Trocknung einen linearen Temperaturanstieg erfährt. Die Aufheizung des Trockenmasseanteils der Biomasse wird auf Basis einer Korrelation zur Berechnung der spezifischen Wärmekapazität der Biomasse nach OHLINGER et al. [116] berechnet, vgl. Gleichung 16. Dabei wird berücksichtigt, dass sich die Eigenschaften der Biomasse während der Aufheizung und Torrefizierung verändern und sich an die Eigenschaften von Holzkohle annähern. Für T_{BM} muss dabei die Temperatur der Biomasse in Kelvin eingesetzt werden.

$$c_{p,torr} = 595 + 1,893 \cdot T_{BM} \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right] \quad (16)$$

Die thermischen Verluste des Reaktors durch Abstrahlung und Konvektion werden nach [108] abgeschätzt. Die über den Spülgasstrom eingebrachte Wärme bzw. die zur Aufheizung des Spülgasstroms nötige Wärme wird ebenfalls berücksichtigt.

Aus den genannten Teilenergien kann der thermische Gesamtbedarf des Reaktors $\dot{Q}_{ges,Reaktor}$ berechnet werden. Durch Vorgabe der Heizdampfparameter bzw. der Heizgastemperaturen am Ein- und Austritt des Reaktors und durch Ermittlung der zugehörigen Enthalpiedifferenz ΔH wird der jeweils erforderliche Massenstrom nach Gleichung 17 berechnet.

$$\dot{m}_{HD;HG} = \frac{\dot{Q}_{ges,Reaktor}}{\Delta H_{HD,HG}} \quad (17)$$

5.4.2 Thermochemisches Modell

Kinetik der Torrefizierung

Mathematische Modelle zur Beschreibung der Kinetik bei der Torrefizierung von Biomasse haben ihren Ursprung in der Regel in der Modellierung von Pyrolyseprozessen. Einen guten Überblick über verschiedene Pyrolysemodelle, die zur Berechnung der Torrefizierung diskutiert werden, liefert [118].

Ein großer Teil der mit der Modellierung von Torrefizierungsprozessen beschäftigten Autoren verwenden zur Beschreibung der Kinetik den in Abbildung 5.7 dargestellten Zwei-Schritt-Ansatz nach DI BLASI und LANZETTA [119], [120], [121], [122]. Neben der sehr guten Übereinstimmung der Ergebnisse mit experimentell ermittelten Werten liegt die Verwendung dieses Ansatzes auch deshalb nahe, weil er ursprünglich zur Beschreibung der Pyrolyse von Hemicellulose entwickelt wurde, der wichtigsten und reaktivsten Makrokomponente bei der Torrefizierung von Biomasse [121]. Aus den genannten Gründen wird der Modellansatz nach DI BLASI und LANZETTA zur Beschreibung der Torrefizierungskinetik im Rahmen dieser Arbeit ausgewählt. Es wird angenommen, dass die Kinetik der Torrefizierungsreaktion geschwindigkeitsbestimmend ist und keine Limitierungen durch Wärmeleitung o. ä. auftreten.

Der erste Reaktionsschritt, bei dem der Ausgangsstoff A (trockenes Holz) in die beiden sog. Pseudokomponenten B (fest) und V_1 (gasförmig) umgewandelt wird, beschreibt die Zersetzung von Hemicellulose und stellt den schnelleren der beiden Reaktionsschritte dar. Der zweite, langsamere Reaktionsschritt repräsentiert durch die Umwandlung von B in die Pseudokomponenten C und V_2 die weitere Zersetzung der festen Zersetzungsprodukte aus dem ersten Reaktionsschritt sowie die teilweise Zersetzung von Cellulose und Lignin. Nach Abschluss der Torrefizierungsreaktion bildet die Summe der Komponenten A, B und C das feste Torrefizierungsprodukt und die Summe aus V_1 und V_2 das gasförmige Produkt.

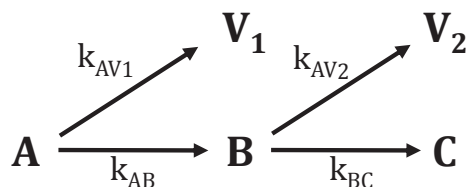


Abbildung 5.7: Zwei-Schritt-Modellansatz nach DI BLASI und LANZETTA [119]

Die Geschwindigkeit der in Abbildung 5.7 dargestellten Reaktionsschritte ist von der Reaktionstemperatur abhängig. Die kinetischen Parameter k_i werden nach dem Arrhenius Ansatz in Gleichung 18 berechnet. Dabei bezeichnet R die universelle Gaskonstante mit dem Wert $8,314 \frac{J}{K \cdot mol}$ und T die Temperatur der Biomasse in Kelvin.

$$k_i = k_0 \cdot e^{-\frac{E_A}{R \cdot T}} \quad (18)$$

Die Parameter E_A und k_0 werden durch Kurvenanpassung auf Basis experimentell ermittelter Werte bestimmt. Dazu führt PRINS in [92] unter Verwendung von Weidenholz zahlreiche thermogravimetrische Analysen (TGA) durch. Dabei wird der Temperaturbereich zwischen 230 und 300 °C und die Heizrate zwischen 10 und 100 K/min variiert. Die für den Modellansatz nach DI BLASI und LANZETTA zu verwendenden Werte für alle E_A und k_0 sind in Tabelle 5.4 dargestellt.

Tabelle 5.4: Kinetische Parameter für Weidenholz aus [92]

	k_{AB}	k_{BC}	k_{AV1}	k_{BV2}
E_A J/mol	75.976	151.711	114.214	151.711
k_0 -	$2,48 \cdot 10^4$	$1,1 \cdot 10^7$	$3,23 \cdot 10^7$	$1,59 \cdot 10^{10}$

Zur Berechnung der jeweiligen Massenanteile der Pseudokomponenten A, B, C, V_1 und V_2 werden die Differentialgleichungen in Gleichung 19 bis 21 formuliert.

$$\frac{\partial A}{\partial t} = -(k_{AB} + k_{AV1}) \cdot A \quad (19)$$

$$\frac{\partial B}{\partial t} = k_{AB} \cdot A - (k_{BC} + k_{BV2}) \cdot B \quad (20)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = k_{BC} \cdot B \quad (21)$$

Unter Beachtung der Randbedingung, dass zu Reaktionsbeginn 100% der Gesamtmasse aus Komponente A bestehen, kann somit die Veränderung und damit der prozentuale Anteil der Komponenten A, B, C, V_1 und V_2 an der Gesamtmasse für jedes Volumenelement des Reaktormodells berechnet werden. Dadurch ist die Bestimmung des Torrefizierungsgrads in Abhängigkeit von der Temperaturkurve

des Holzes im Reaktor für beliebige Verweilzeiten, Reaktorgeometrien und Wärmedurchgangswerte möglich.

Auf Basis der in Kapitel 3 erläuterten Temperaturbereiche bei der Torrefizierung von Holz werden die kinetischen Parameter und die Torrefizierungsreaktion im Modell in Anlehnung an [55] erst ab dem Erreichen einer Biomassetemperatur von 200 °C berechnet. Bis zum Erreichen der Temperatur von 200 °C findet demnach ausschließlich die Aufwärmung und Trocknung der Biomasse statt.

Elementare Massenbilanz

Neben den experimentell ermittelten Daten, die zur Bestimmung der kinetischen Parameter in Tabelle 5.4 verwendet wurden, hat PRINS [92] bei seinen Messungen auch die Zusammensetzung der entstehenden gasförmigen Komponenten analysiert und dabei neun verschiedene Bestandteile identifiziert. Auf Basis dieser Daten schlägt BATES [60] eine Erweiterung des beschriebenen thermochemischen Modells zur Bestimmung der elementaren Zusammensetzungen aller Pseudokomponenten vor.

Tabelle 5.5: Chemische Komponenten im gasförmigen Produkt und deren durch Minimierung der Fehlerquadrate bestimmte Anteile in den Pseudokomponenten nach [60]

Komponente	Summenformel	Gewichtsanteil in V_1	Gewichtsanteil in V_2
		%	%
Essigsäure	$C_2H_4O_2$	14,9	15,2
Wasser	H_2O	47,3	11,7
Ameisensäure	HCO_2H	5,1	6,5
Methanol	CH_3OH	4,5	28,8
Milchsäure	$C_3H_6O_3$	1,5	30,4
Furfural	$C_5H_4O_2$	1,1	0,0
Hydroxyaceton	$C_3H_6O_2$	1,0	7,4
Kohlenstoffdioxid	CO_2	20,4	0,0
Kohlenstoffmonoxid	CO	4,2	0,0

Dazu werden die gemessenen Zusammensetzungen des gasförmigen Produkts durch die Anwendung der Methode der kleinsten Fehlerquadrate so auf die zwei Pseudokomponenten V_1 und V_2 verteilt, dass bei der Berechnung der Zusammensetzung des gasförmigen Produkts im Vergleich zu den experimentell

ermittelten Daten möglichst geringe Abweichungen auftreten. Die neun identifizierten chemischen Substanzen sowie die von BATES bestimmten Massenanteile dieser Substanzen in V_1 und V_2 sind in Tabelle 5.5 dargestellt.

Zusammen mit der elementaren Zusammensetzung der von PRINS eingesetzten Biomasse und den molaren Massen für Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff kann auf Basis der Summenformeln und der Gewichtsanteile aus Tabelle 5.5 die elementare Zusammensetzung aller Pseudokomponenten und damit auch des festen und gasförmigen Torrefizierungsprodukts berechnet werden. Die elementaren Zusammensetzungen der eingesetzten Biomasse und die nach BATES [60] bestimmten elementaren Zusammensetzungen der Pseudokomponenten V_1 und V_2 sind in Tabelle 5.6 dargestellt.

Tabelle 5.6: Elementare Zusammensetzung des verwendeten Holzes und der Pseudokomponenten V_1 und V_2 nach [60]

	Weide	V_1	V_2
	% _{waf}	%	%
Kohlenstoff	48	18	34
Wasserstoff	6	7	9
Sauerstoff	46	75	57

Heizwerte

Die Berechnung des oberen Heizwerts des festen Produkts erfolgt durch Anwendung einer Korrelation auf Basis der elementaren Zusammensetzung nach BOIE [123], vgl. Gleichung 22.

$$H_o = (151,2 \cdot \gamma_C + 499,77 \cdot \gamma_H - 47,7 \cdot \gamma_O + 45 \cdot \gamma_S - 27 \cdot \gamma_N) \cdot 232,6 \quad (22)$$

Für γ_C , γ_H , γ_O , γ_N und γ_S sind die jeweiligen Massenanteile der trockenen, torrefizierten Biomasse einzusetzen. Die Umrechnung des oberen auf den unteren Heizwert erfolgt durch Berücksichtigung des Wasserstoff- und des Wassergehalts des Brennstoffs nach Gleichung 23.

$$H_u = H_o - 2442 \cdot (8,936 \cdot \gamma_H + \gamma_{H_2O}) \quad (23)$$

Die Korrelation nach BOIE wurde ursprünglich zur Berechnung des oberen Heizwerts von Kohlen ermittelt, kann aber aufgrund der gegenüber nicht torrefizierter Biomasse veränderten, kohleähnlichen Eigenschaften der torrefizierten Biomasse mit guten Ergebnissen auch dafür eingesetzt werden. Der

Heizwert des gasförmigen Torrefizierungsprodukts wird auf Basis einer Energiebilanz um den Reaktor berechnet.

5.5 Kühler

Die Biomasse verlässt den Torrefizierungsreaktor mit der höchsten im Prozess auftretenden Temperatur, die in der Regel oberhalb der Zündtemperatur der torrefizierten Biomasse liegt [70]. Durch Kontakt dieser heißen, torrefizierten Biomasse mit Luftsauerstoff kann es zur spontanen Entzündung kommen. Um dieses Risiko zu vermeiden, wird die Biomasse nach Verlassen des Torrefizierungsreaktors meist unter Verwendung von Schneckenkühlern auf eine zur anschließenden Pelletierung oder Mahlung günstige Temperatur um 100 °C abgekühlt [90]. Ziel ist es, die Biomasse innerhalb möglichst kurzer Zeit abzukühlen, um die weitere Ausgasung der Biomasse nach Verlassen des Reaktors zu minimieren. Diese fortgesetzte Ausgasung der Biomasse kann zur Bildung von Teerablagerungen infolge der kondensierbaren Anteile des Torrefizierungsgases und zu einer sich daraus ergebenden Verschlackung des Schneckenkühlers führen. Um dem entgegen zu wirken, kann ein Teil des im Schneckenkühler abgekühlten Torrefizierungsprodukts dem heißen Produktstrom direkt nach dem Austritt aus dem Torrefizierungsreaktor beigemischt werden [90]. Die im Verlauf des Torrefizierungsprozesses entstehenden gasförmigen Produkte werden dem Prozess gesondert entzogen und nicht durch den Kühler geführt.

5.6 Pelletierung

Mittels Pelletierung kann aus einem inhomogenen und aus logistischer Sicht schwierigen Ausgangsstoff, wie z. B. Holzhackgut, ein Produkt mit definierten Eigenschaften, hoher Schüttgutedichte und damit guten Transporteigenschaften erzeugt werden. Zur Pelletierung von Biomasse kommen in der Regel Flach- oder Ringmatrizenpressen zum Einsatz. Die zuvor auf maximale Korngrößen zwischen 3 und 6,5 mm zerkleinerten Biomassepartikel werden durch eine Matrize gepresst. Durch die dabei entstehende Reibungswärme kommt es zur Erweichung des enthaltenen Lignins und dadurch zur Bindung der Biomassepartikel im Pellet [57]. Die Qualität der Pelletierung und die Leistungsaufnahme einer Pelletpresse hängen von vielen Parametern wie z. B. Temperatur, Pressdruck, Qualität und Feuchte des Ausgangsmaterials sowie Anordnung und Dimensionen der Matrize und der

Presswalzen ab. Pelletpressen werden daher für jede Anwendung und jeden Ausgangsstoff neu getestet und den entsprechenden Anforderungen angepasst.

Pelletierung von getrocknetem Holz

Die Modellierung der Pelletierung erfolgt auf Basis spezifischer Werte für den elektrischen Aufwand. In der Literatur finden sich dafür verschiedene Informationen, die teilweise stark voneinander abweichen. Deshalb werden Erfahrungswerte eines Herstellers für Pelletpressen [124] herangezogen, der die spezifische Leistungsaufnahme bei der Pelletierung von Holz mit Werten zwischen 40 und 60 kWh/t angibt. Im Modell wird mit 50 kWh/t der Mittelwert dieses Bereichs als Referenzwert angenommen.

Pelletierung von torrefiziertem Holz

Durch die Torrefizierung kommt es zu einem höheren Energieverbrauch bei der Pelletierung [8]; mit zunehmendem Torrefizierungsgrad steigt der Energieverbrauch an [78]. Bei Versuchen zur Pelletierung trockener, torrefizierter Biomasse kam es teilweise zu einem sehr hohen elektrischen Energieaufwand und nur bei hohen Pelletierungstemperaturen um 200 °C zu guten Ergebnissen hinsichtlich der Pelletqualität. Durch Anfeuchtung auf etwa 10% Wassergehalt konnten auch mit torrefiziertem Material bei üblichen Pelletierungstemperaturen um 110 °C gute Ergebnisse hinsichtlich der Parameter Pelletdichte und Haltbarkeit erreicht werden [78]. Die Qualität der torrefizierten Pellets reicht in vielen Fällen nicht an die Qualität normaler Holzpellets heran. Es besteht nach KOPPEJAN [46] aber noch erhebliches technologisches Entwicklungspotential. Auch der Einsatz von Zuschlagstoffen und Bindemitteln zur Verbesserung der Pelletqualität wird diskutiert. Nach Informationen des bereits genannten Herstellers von Pelletpressen [124] kann von einem spezifischen Leistungsbedarf von 60 – 90 kWh/t ausgegangen werden. Im Modell wird mit 75 kWh/t der Mittelwert dieses Bereichs als Referenzwert angenommen.

5.7 Transport

Die Berücksichtigung der Bereitstellung bzw. Ernte sowie des Transports der verwendeten Brennstoffe erfolgt auf Basis der entstehenden CO₂-Emissionen. Dabei ist anzumerken, dass lediglich die direkt mit Bereitstellung bzw. Ernte und Transport verbundenen CO₂-Emissionen aus fossilen Quellen wie Treib- und Brennstoffen sowie durch den Verbrauch von Strom berücksichtigt werden. Eine zusätzliche Erfassung sekundärer Effekte durch veränderte Landnutzung, mögliche

Methanausgasung bei der Holzlagerung und dergleichen werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt.

Bereitstellung bzw. Ernte

Die Bereitstellung von Steinkohle aus einem Tagebau wird auf Basis einer Studie des *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) der USA berücksichtigt [125]. Demnach werden pro Million Tonnen geförderter Steinkohle 14.300 MWh Strom, 269 m³ Treibstoff sowie 2.070 t Sprengstoff in Form von Ammoniumnitrat eingesetzt. Durch Anwendung der in Tabelle 5.7 dargestellten Emissionsfaktoren ergeben sich daraus unter Vernachlässigung des verwendeten Sprengstoffs die in Tabelle 5.8 aufgeführten spezifischen Werte für die CO₂-Emissionen.

Tabelle 5.7: Emissionsfaktor von Diesel und Strom in den USA [126], [127]

	Emissionsfaktor
Strommix USA	0,499 kg _{CO2} /kWh _{el}
Diesel	3,132 kg _{CO2} /l

Zur Ermittlung der CO₂-Emissionen durch die Ernte der Holzhackschnitzel werden die Ergebnisse einer Studie von EBERHARDINGER et al. [12] herangezogen. Danach werden zur Bereitstellung von Holzhackschnitzeln mit 50 % Wassergehalt aus forstwirtschaftlich geerntetem Holz etwa 2,5 % des Energieinhalts des Frischholzes aufgewendet. Unter der Annahme, dass die Bereitstellungsenergie vollständig durch Dieselkraftstoff erbracht wird, und durch Anwendung des in Tabelle 5.7 aufgeführten Emissionsfaktors für Dieselkraftstoff ergeben sich die in Tabelle 5.8 für Holzhackgut dargestellten Werte.

Tabelle 5.8: CO₂-Emissionen durch Ernte bzw. Bereitstellung

	CO ₂ -Emissionen
Steinkohle	8 kg/t
Holzhackgut	15 kg/t

Transport der Brennstoffe

Für die Abschätzung der CO₂-Emissionen durch den Transport wird das frei verfügbare Berechnungstool EcoTransIT verwendet [1]. Es handelt sich dabei um einen Onlinerechner, der von verschiedenen Verkehrsunternehmen zur Ermittlung der Umweltauswirkungen diverser Verkehrsträger zur Verfügung gestellt wird. Die wissenschaftliche Betreuung und Pflege des Tools erfolgt durch das Institut für

Energie- und Umweltforschung (ifeu) in Heidelberg und durch die INFRAS AG in Bern.

Durch Vorgabe eines Transportmittels, der Masse und des Volumens eines zu transportierenden Guts sowie des Start- und Zielpunkts des Transports liefert das Tool die entsprechenden Ergebnisse. Daraus lassen sich für die relevanten Verkehrsmittel spezifische Werte für die CO₂-Emissionen berechnen, die in Tabelle 5.9 dargestellt sind. Dabei ergeben sich die Werte in Abhängigkeit von der Schüttgutdichte eines Brennstoffs sowie der maximalen Zuladung eines Transportmittels bezüglich Masse und Volumen. So kommt es beispielsweise bei den Brennstoffen Holzpellet und torrefiziertes Holzpellet beim Transportmittel LKW zu den gleichen spezifischen Zahlen für die CO₂-Emissionen, weil die maximale Zuladung bezüglich der Masse bei beiden Brennstoffen ausgereizt ist, bevor es zu Limitierungen beim Transportvolumen kommt. Dennoch werden aufgrund unterschiedlicher Energiegehalte beim Transport von torrefizierten Holzpellets pro transportierter Energiemenge weniger CO₂-Emissionen freigesetzt.

Tabelle 5.9: CO₂-Emissionen durch Transport von Brennstoffen mit verschiedenen Transportmitteln

	CO ₂ -Emissionen kg/(t · 100 km)
Steinkohle	
LKW - Sattelkipper	6,230
Güterzug - Diesel	2,319
Seeschiff - Panamax	0,409
Holzhackgut 50% H₂O	
LKW - Sattelkipper	7,330
Güterzug - Diesel	3,803
Seeschiff - Panamax	0,679
Holzpellet	
LKW - Sattelkipper	6,230
Güterzug - Diesel	2,512
Seeschiff - Panamax	0,409
torr. Holzpellet	
LKW - Sattelkipper	6,230
Güterzug - Diesel	2,319
Seeschiff - Panamax	0,409

Durch die Vorgabe definierter Transportrouten und Transportmittel können unter Verwendung der Werte aus Tabelle 5.9 die entstehenden CO₂-Emissionen für verschiedene Brennstoffe miteinander verglichen werden.

Abhängig von der betrachteten Variante ergeben sich bezüglich des Brennstofftransports unterschiedliche Randbedingungen. Bei der Vorbehandlung in Einzelanlagen unabhängig vom Kraftwerksprozess wird vom Biomasseimport aus Nordamerika ausgegangen. Die betrachteten Transportmittel und Distanzen orientieren sich am Logistikkonzept der 2011 in Waycross, Georgia, USA in Betrieb gegangenen Pelletproduktionsanlage der Georgia Biomass LLC zur Produktion von 750.000 t/a Holzpellets [13]. Dort wird Holz aus dem Wald per LKW nach Waycross zum Pelletwerk geliefert. Die Pellets werden per Güterzug zum Seehafen nach Savannah transportiert und anschließend nach Nordeuropa verschifft. Die angenommenen Distanzen sind in Tabelle 5.10 dargestellt.

Bei den Betrachtungen zur integrierten Vorbehandlung am Kraftwerksstandort werden lokal verfügbare Holzhackschnitzel betrachtet; die Anlieferung wird per LKW aus einer durchschnittlichen Distanz von 100 km angenommen. Bei der Steinkohle wird von einem Transport mittels Seeschiff vom kolumbianischen Steinkohlebergwerk El Cerrejón nach Europa ausgegangen. Die resultierenden Transportmittel und Distanzen sind in Tabelle 5.10 dargestellt.

Tabelle 5.10: Betrachtete Transportmittel und Distanzen

Biomasse; Import aus Nordamerika	Transportmittel	Distanz in km
Wald → Pelletwerk	LKW	50
Pelletwerk → Seehafen	Zug	160
Seehafen → Europa/Kraftwerk	Seeschiff	7500
Biomasse; Lokal		
Wald → Kraftwerk	LKW	100
Steinkohle		
Kolumbien → Kraftwerk	Seeschiff	8500

5.8 Brennstoffe

Neben dem Auslegungsbrennstoff Steinkohle wird Biomasse in Form von Holzhackschnitzeln als Mitverbrennungsbrennstoff untersucht. Beide Brennstoffe werden im Folgenden genauer definiert.

Steinkohle

Mit der Steinkohlesorte El Cerrejón aus Kolumbien wird eine typische Importkohlesorte ausgewählt, die in vielen deutschen Steinkohleanlagen zum Einsatz kommt. Die wichtigsten Parameter, wie die elementare Zusammensetzung und der Heizwert, sind in Tabelle 5.11 dargestellt.

Tabelle 5.11: Elementare Zusammensetzung und unterer Heizwert der betrachteten Kohlesorte El Cerrejón

C	% _{tr}	72,4
H	% _{tr}	5,0
O	% _{tr}	9,1
N	% _{tr}	1,2
S	% _{tr}	0,7
Asche	% _{tr}	11,6
H ₂ O	% _{roh}	10,7
H _u	MJ/kg _{roh}	25,98

Holz

Nach [55] ist die Reaktivität von Holz bei der Torrefizierung hauptsächlich davon abhängig, ob es sich um Laub- oder Nadelholz handelt. Die Unterschiede zwischen verschiedenen Vertretern innerhalb dieser Gruppen sind dagegen vernachlässigbar. PRINS hat das vorgestellte kinetische Modell auf Basis von Experimenten mit Weidenholz erstellt, einem typischen Laubholz. Die ergänzenden Arbeiten von BATES basieren ebenfalls auf den Ergebnissen von PRINS. Aus diesem Grund wird in der vorliegenden Arbeit Weidenholz in Form von Holzhackschnitzeln als Biomasseart ausgewählt. Die elementare Zusammensetzung und der Heizwert sind in Tabelle 5.12 aufgelistet.

Tabelle 5.12: Elementare Zusammensetzung und unterer Heizwert des betrachteten Weidenholzes nach [92]

C	% _{tr}	47,2
H	% _{tr}	6,1
O	% _{tr}	44,8
N	% _{tr}	0,3
Asche	% _{tr}	1,6
H _u	MJ/kg _{tr}	17,37

Das Modell zur Berechnung des Mahlenergieaufwands nach TEMMERMAN wurde für die Holzarten Fichte, Kiefer, Buche und Eiche erstellt, wovon Buche und Eiche zu den Laubbäumen zu zählen sind. Der für Buche ermittelte Materialkennwert liegt nahe dem Durchschnittswert der Materialkennwerte aller vier genannten Hölzer und wird deshalb als universeller Durchschnittswert zur Berechnung des Mahlaufwands für das betrachtete Weidenholz verwendet.

5.9 Integration der Teilmodelle

Im Folgenden werden die auf Basis der erläuterten Teilmodelle erstellten Gesamtprozessmodelle vorgestellt. Zunächst werden wichtige Prozessparameter und Randbedingungen beschrieben sowie Allgemeines zur Anordnung der Einzelkomponenten erläutert.

5.9.1 Allgemeines

Randbedingungen und Prozessparameter

Die wichtigsten Prozessparameter der verwendeten Einzelkomponenten sind in Tabelle 5.13 dargestellt. Die Temperaturen der Heizmedien ergeben sich im Falle der Vorbehandlung am Kraftwerksstandort weitestgehend durch den Kraftwerksprozess. Bei den Einzelanlagen orientieren sich die Werte am ACB Prozess der Firma Andritz [44].

Die genannten Werte für Wassergehalte, Druckverluste, Grädigkeiten, Siebdurchtrittsweiten und isentrope Wirkungsgrade stellen Annahmen dar.

Partikelgröße

Neben der Annahme einer idealen Durchmischung der Biomasse im Torrefizierungsreaktor wird bei der Modellierung außerdem davon ausgegangen, dass die Torrefizierungsreaktion ausschließlich kinetisch kontrolliert stattfinden kann und keine Limitierungen durch Wärmeleitung innerhalb der Partikel entstehen. In der Literatur finden sich zu dieser Annahme widersprüchliche Informationen. Während BERGMAN et al. [55] davon ausgehen, dass die Partikelgröße und damit die Wärmeleitung innerhalb der Biomassepartikel kaum Einfluss hat, zeigt VAN DER STELT [117] durch experimentelle Untersuchungen der Torrefizierung von zylinderförmigen Biomassepartikeln mit Durchmesser bis 3 cm, dass durchaus Temperaturgradienten im Inneren eines Partikels auftreten können.

**Tabelle 5.13: Festgelegte Randbedingungen und Prozessparameter der Teilprozesse
Trocknung, Torrefizierung, Mahlung, Kühlung und Pelletierung**

Trockner			
Wassergehalt Holz Eintritt	gew.-%		50
Wassergehalt Holz Austritt	gew.-%		10
Temperatur Holz Austritt	°C		80
Partikelgröße Eintritt	-	Holzhackgut	
Kondensationstemperatur, dampfbeheizt	°C		150
Temperatur Rauchgas Eintritt, rauchgasbeheizt	°C		300 - 400
Temperatur Rauchgas Austritt, rauchgasbeheizt	°C		90
Vorbrecher			
Sichterdurchtrittsweite	mm		10
Torrefizierung dampfbeheizt			
Kondensationstemperatur, dampfbeheizt	°C		300
Torrefizierung rauchgasbeheizt; Einzelanlage			
Temperatur Rauchgas Eintritt	°C		400
Temperatur Rauchgas Austritt	°C		300
Torrefizierung rauchgasbeheizt; Kraftwerk			
Temperatur Rauchgas Eintritt	°C		360
Temperatur Rauchgas Austritt	°C		280
Kühler			
Temperatur Austritt Biomasse	°C		110
Temperatur Eintritt Kühlwasser	°C		17
Temperatur Austritt Kühlwasser	°C		27
Hammermühle			
Sichterdurchtrittsweite	mm		1
Pelletierung			
Wassergehalt Eintritt	gew.-%		10
Sonstiges			
Isentroper Wirkungsgrad Pumpen	%		85
Isentroper Wirkungsgrad Gebläse	%		80
Druckverlust Zyklon	mbar		20
Grädigkeit Luftvorwärmer; Einzelanlage	K		40
Druckverlust Luftvorwärmer; Einzelanlage	mbar		20
Druckverlust Spülgasströme	mbar		15

PRINS [92] führt Berechnungen auf Basis dimensionsloser Kennzahlen durch, um eine maximale Partikelgröße zu bestimmen, bei der die Annahme einer ausschließlich kinetisch kontrollierten Torrefizierungsreaktion sicher eingehalten werden kann. Demnach kann der Einfluss der Wärmeleitung bei Torrefizierungstemperaturen zwischen 260 und 300 °C nur für Partikeldurchmesser

im Bereich von 4 – 8 mm und kleiner sicher ausgeschlossen werden. Auch für etwas größere Partikel kann von kinetisch dominierten Bedingungen ausgegangen werden. Bei deutlich größeren Partikeln wie Holzhackschnitzeln kann die Leitfähigkeit des Holzes limitierende Einflüsse haben. Auf dieser Basis wird die Annahme getroffen, dass die verwendete Biomasse in Form von Holzhackschnitzeln vor dem Eintritt in den Torrefizierungsreaktor zunächst vorgebrochen werden muss. Zur Berechnung der Leistungsaufnahme dieser Vorzerkleinerung wird das Modell nach TEMMERMAN et al. [101] aus Kapitel 5 angewendet und eine Sieböffnungsweite von 10 mm eingestellt. Die gewählte Siebdurchtrittsöffnung stellt dabei einen Kompromiss zwischen der Einhaltung der von PRINS ermittelten Werte zum maximalen Partikeldurchmesser und dem Bestreben, die Feinmahlung der Biomasse aus energetischen Gründen möglichst erst nach der Torrefizierung durchzuführen, dar.

Im Gegensatz dazu ist die Trocknung von Holz in einem Drehrohrtrockner nach Aussagen eines Trocknerherstellers [109] auch bei größeren Partikeldimensionen wie z. B. bei typischen Holzhackschnitzelchargen möglich. Die Vorzerkleinerung kann also nach der Trocknung der Biomasse erfolgen.

Pelletierung

Durch die Erhöhung der Schüttgut- und damit der Energiedichte bei der Pelletierung ergeben sich Vorteile bei Transport und Lagerung. Entsprechend wird bei den betrachteten Importvarianten die Pelletierung in die Vorbehandlung der Biomasse am Ort des Biomasseanfalls integriert. Bei den Varianten mit integrierter Vorbehandlung in einem Kraftwerksprozess wird dagegen auf die Pelletierung verzichtet [46].

Kühler

Eine Einbindung der im Schneckenkühler übertragenen Wärmemenge in die Niederdruckvorwärmstrecke ist theoretisch denkbar. Aufgrund hoher Grädigkeiten zur Realisierung möglichst kurzer Verweilzeiten im Schneckenkühler und den vergleichbar geringen Wärmemengen wird auf die Nutzung der Abwärme verzichtet und Kühlwasser aus dem Kühlkreislauf des Kraftwerks zum Betrieb des Schneckenkühlers verwendet.

Hammermühle

Aufgrund der höheren Gehalte an flüchtigen Komponenten und daraus resultierender höherer Reaktivität bei der Verbrennung sind die Anforderungen an die Partikelgröße nach der Mahlung bei Biomasse kleiner als bei Steinkohle. SOERENSEN [30] geht davon aus, dass 85% der Biomassepartikel nach der Mahlung kleiner als 1 mm sein müssen. Ähnliche Werte findet man bei MIDDELKAMP [38], der davon ausgeht, dass 90% der Biomassepartikel kleiner als 1 mm und 100% der Partikel kleiner als 3 mm sein müssen. Um alle Vorgaben sicher einhalten zu können, wird im Modell für x_2 eine Siehterdurchtrittsöffnung von 1 mm eingestellt. Die Ausgangspartikelgröße x_1 wird bei der Mahlung von Holzhackschnitzeln mit 40 mm und bei der Mahlung von Holzpellets mit 8 mm angenommen.

Nach [29] darf die Temperatur der Fluidisierungsluft aus Sicherheitsgründen 110 °C nicht überschreiten. Deshalb wird die Fluidisierungsluft bei den im Kraftwerk integrierten Varianten aus vorgewärmter Luft und Kaltluft gemischt und dadurch auf eine Temperatur von 110 °C eingestellt. Bei der vom Kraftwerk unabhängigen Vorbehandlung erfolgt die Fluidisierung mit Umgebungsluft.

5.9.2 Integration in den Kraftwerksprozess

Vereinfachte Prozessschaltbilder der drei Varianten mit im Kraftwerksprozess integrierter Biomassevorbehandlung sind in Abbildung 5.8, Abbildung 5.9 und in Abbildung 0.2 in Anhang A.1 dargestellt. Bei allen Varianten findet zunächst die Trocknung der rohen Biomasse auf 10% Wassergehalt in einem mit Anzapfdampf aus der MD/ND-Überströmleitung beheizten Trockner statt. Im Vollastbetrieb liegt Dampf mit einem Druck von 5,4 bar vor; damit kann der Trockner bei einer Kondensationstemperatur von etwa 150 °C betrieben werden. Das aus dem Heizdampf entstehende Kondensat wird dem Speisewasserbehälter des Kraftwerksprozesses annähernd temperaturgleich zugeführt. Die im Trockner entstehenden Brüden werden durch einen Spülluftstrom aus dem Reaktor gespült und in einem Zyklon weitgehend von mitgerissenen Feststoffen befreit. Anschließend wird der gereinigte Gasstrom aus Spülluft und Brüden zur Vorwärmung des eintretenden Spülluftstroms über einen Wärmeübertrager geführt. Die Berechnung des Wärmeübertragers zur Spülluftvorwärmung wird nach EVERTS [98] durchgeführt. Die beim Spülluftstrom in Reaktor, Zyklon und Wärmeübertrager auftretenden Druckverluste werden durch ein Gebläse überwunden.

Anschließend erfolgt die Vorzerkleinerung der Holzhackschnitzel in einem Vorbrecher, bevor die Torrefizierung im jeweiligen Torrefizierungsreaktor stattfinden kann. Nach Durchlaufen des Torrefizierungsreaktors und der direkt anschließenden Kühlung erfolgen die Feinmahlung in der Hammermühle und die Verbrennung der torrefizierten Biomasse im Dampferzeuger.

Beheizung der Torrefizierung mit Dampf – Variante IntegDampf_AWL

Die Wahl des Dampfdruckniveaus zur Beheizung eines Reaktors ist direkt mit der erforderlichen Kondensationstemperatur verbunden. Die in den vorhandenen Anzapfungen und in der Zwischenüberhitzung des Kraftwerksprozesses auftretenden Dampfdrücke ermöglichen Kondensationstemperaturen von maximal 250 °C. Da zum Betrieb eines Torrefizierungsreaktors Temperaturen um 300 °C nötig sind, kann der Reaktor im verwendeten Kraftwerksprozess nur mit Frischdampf aus dem Dampferzeuger versorgt werden. Der entnommene Dampf wird entsprechend gedrosselt und vor dem Eintritt in den Torrefizierungsreaktor durch Kondensateinspritzung aufgesättigt. Die Rückführung des entstehenden Kondensats erfolgt annähernd temperaturgleich vor Eintritt des Speisewassers in den Dampferzeuger. Ein vereinfachtes Prozessschema ist in Abbildung 5.8 dargestellt.

Alternativ dazu ist zur Verbesserung des Gesamtwirkungsgrads auch eine stufenweise Aufheizung der Biomasse unter Verwendung verschiedener Dampfqualitäten denkbar, die Umsetzung erfolgt mit Variante IntegDampfVW_AWL. Dazu kann die Aufheizung der Biomasse nach dem Verlassen des Trockners in zwei Reaktoren oder möglicherweise auch in einem kombinierten Torrefizierungsreaktor mit zwei Temperaturstufen erfolgen. Zur Beheizung der Vorwärmstufe zwischen Trockner und Torrefizierungsreaktor bietet sich die Verwendung von Dampf aus der kalten Zwischenüberhitzung mit einer Kondensationstemperatur von etwa 250 °C an. Die Biomasse kann damit auf etwa 200 °C vorgewärmt und das noch enthaltene Wasser ausgetrieben werden, ohne die erst oberhalb von 200 °C stattfindenden Torrefizierungsreaktionen in Gang zu setzen. Der eigentliche Torrefizierungsreaktor wird wie oben beschrieben mit Frischdampf beheizt; die Biomasse wird weiter aufgewärmt und die Torrefizierungsreaktionen finden statt. Dem zu erwartenden Wirkungsgradvorteil steht der erhöhte anlagentechnische Aufwand durch die Verwendung eines zusätzlichen Reaktors gegenüber. Ein vereinfachtes Prozessschaltbild dieser Variante ist in Abbildung 0.2 in Anhang A.1 dargestellt.

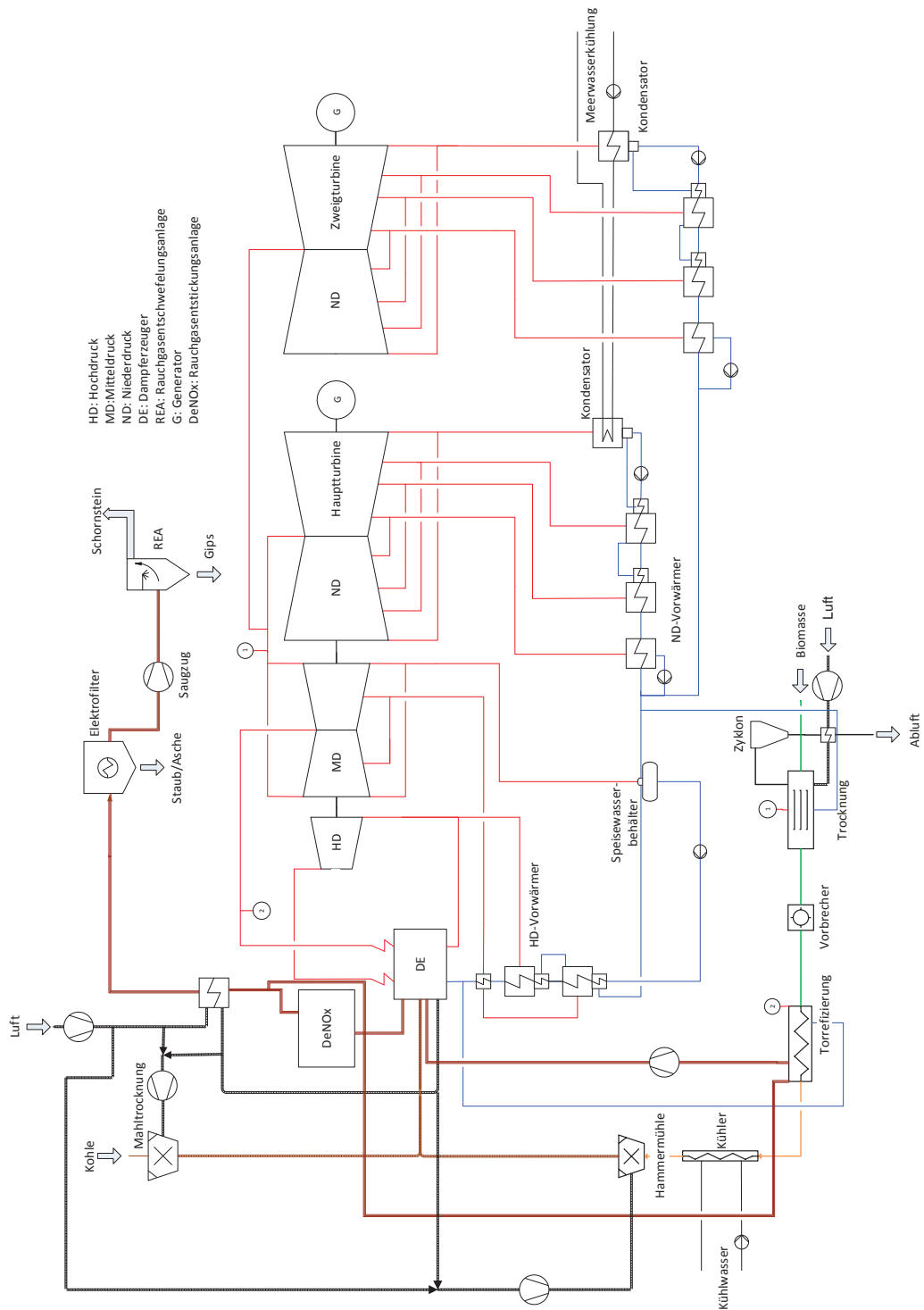


Abbildung 5.8: Vereinfachtes Prozessschaltbild der in den Kraftwerksprozess integrierten Vorbehandlung von Biomasse mit dampfbeheizter Torrefizierung – IntegDampf_AWL

Zur Beförderung der gasförmigen Produkte des Torrefizierungsprozesses aus dem Reaktor ist bei den beiden beschriebenen Varianten mit dampfbeheizter Torrefizierung ein möglichst inerte Spülgasstrom notwendig. Hierzu wird Rauchgas vor dem Luftvorwärmer aus dem Kraftwerksprozess entnommen. Die resultierende Mischung aus Rauchgas und Torrefizierungsgasen wird zur Überwindung der Druckverluste zunächst über ein Gebläse und anschließend zur thermischen Nutzung der enthaltenen brennbaren Komponenten in den Dampferzeuger geführt.

Beheizung der Torrefizierung mit Rauchgas – Variante IntegRG_AWL

Bei der zweiten betrachteten Variante der integrierten Vorbehandlung wird die zur Beheizung des Torrefizierungsreaktors nötige thermische Energie durch heiße Rauchgase aus dem Kraftwerksprozess bereitgestellt. Die Entnahme erfolgt nach dem Austritt aus der Entstickungsanlage bei etwa 360 °C. Die Beheizung erfolgt indirekt, dadurch enthalten die Rauchgase kein Torrefizierungsgas und können dem Kraftwerksprozess nach Durchlaufen des Torrefizierungsreaktors vor dem Eintritt in den Luftvorwärmer wieder zugeführt werden. Am Austritt des Torrefizierungsreaktors liegen die Temperaturen des abgekühlten Heizgases bei etwa 280 °C. Nachdem das Heizgas zur Überwindung der Druckverluste durch ein Gebläse geführt wird, erfolgt die Rückführung zum Rauchgasstrom vor dem Eintritt in den Luftvorwärmer bei etwa 290 °C. Ein vereinfachtes Prozessschema ist in Abbildung 5.9 dargestellt.

Wie bei der dampfbeheizten Variante ist auch hier ein Spülgasstrom zur Beförderung der Torrefizierungsgase aus dem Reaktor erforderlich. Dazu erfolgt die Entnahme eines Teilstroms der zur Beheizung entnommenen Rauchgase, der dann im direkten Kontakt durch den Reaktor geführt wird. Die Rückführung des Spülgasstroms über ein Gebläse in den Dampferzeuger erfolgt analog zu den dampfbeheizten Varianten.

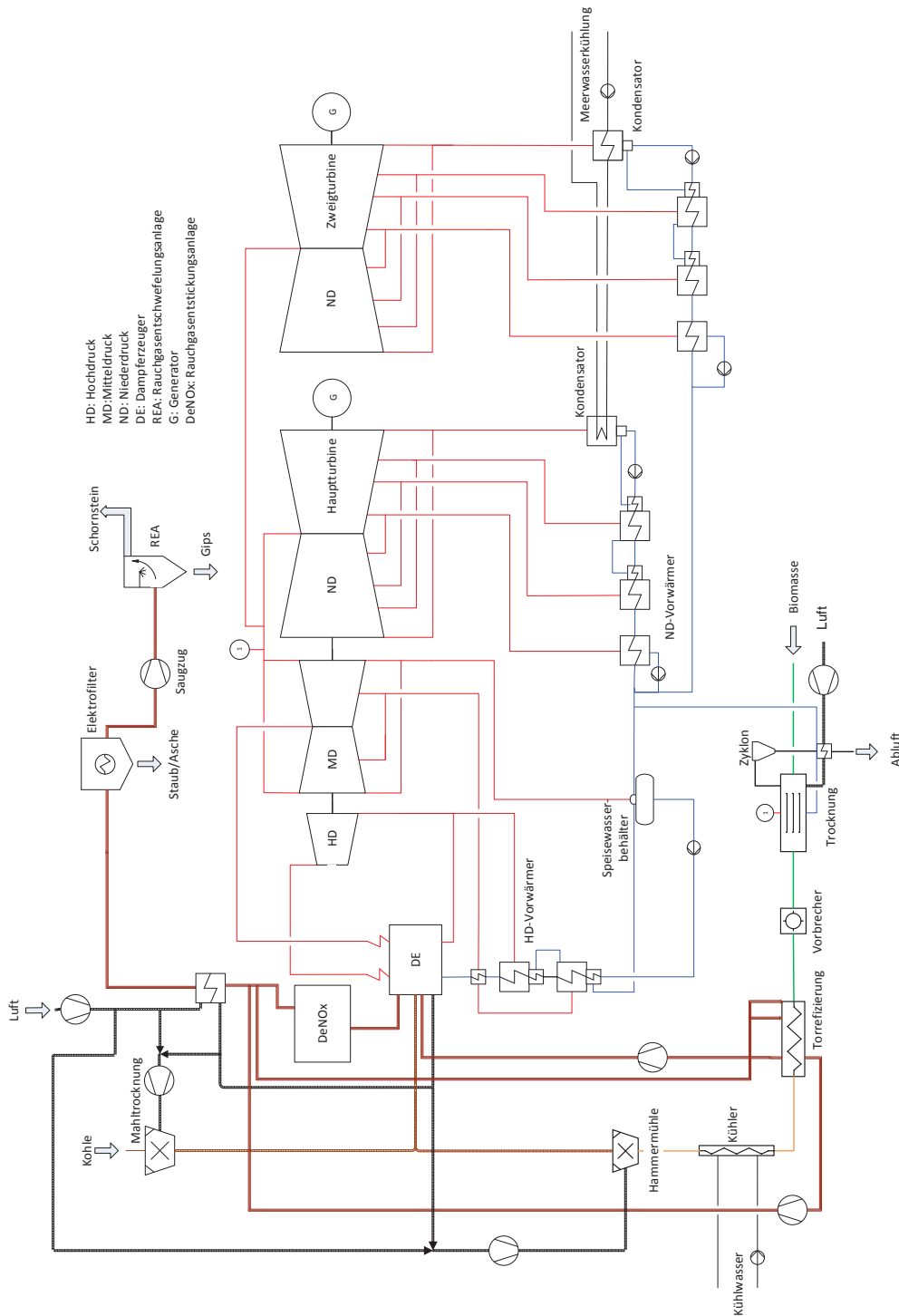


Abbildung 5.9: Vereinfachtes Prozessschaltbild der in den Kraftwerksprozess integrierten Vorbehandlung von Biomasse mit rauchgasbeheizter Torrefizierung - IntegRG_AWL

5.9.3 Eigenständige Anlagen zur Pelletproduktion

Im Gegensatz zu den beschriebenen integrierten Varianten erfolgt die Versorgung der eigenständigen Anlagen nicht mit Energie aus einem Kraftwerksprozess. Thermische Energie wird durch die Verbrennung von Rohbiomasse mit 50% Wassergehalt erzeugt, die notwendige elektrische Energie wird dem Stromnetz entnommen. Die Betrachtung dieser Importvarianten erfolgt durch die im Folgenden vorgestellten Prozessmodelle.

Neben einer Anlage zur Trocknung und Pelletierung von Holz wird eine Anlage zur Trocknung, Torrefizierung und Pelletierung von Holz vorgestellt. Dabei orientiert sich die Abfolge der einzelnen Prozessschritte an üblicherweise eingesetzten Anlagenkonfigurationen zur Herstellung von nicht torrefizierten Holzpellets [13]. Bei der Anlage zur Herstellung torrefizierter Pellets wird das verwendete Prozessschema erweitert und an den TOP Prozess von ECN [55] sowie an den ACB Prozess der Firma Andritz angelehnt [44].

Die Biomasse sollte zur Optimierung der Pelletqualität und zur Minimierung des Leistungsbedarfs Wassergehalte zwischen 10 und 15% aufweisen [57]. Entsprechend wird bei der Anlage zur Produktion von Holzpellets vor der Pelletierung eine Trocknung auf einen Wassergehalt von 10 gew.-% angenommen. Bei der Anlage zur Erzeugung torrefizierter Holzpellets wird vor der Pelletierung eine Anfeuchtung der torrefizierten Biomasse auf einen Wassergehalt von ebenfalls 10 gew.-% vorgenommen. Auch die Pelletierungstemperatur wirkt sich auf Produktqualität und Energieaufwand aus. Bei vorhergehender Trocknung liegt das Holz mit etwa 80 – 90 °C vor und kann direkt pelletiert werden. Bei vorhergehender Torrefizierung ist vor der Pelletierung die Kühlung der Biomasse auf etwa 110 °C notwendig.

Anlage zur Trocknung und Pelletierung von Holz – Variante Import_AWLO

In Abbildung 5.10 ist ein vereinfachtes Prozessschaltbild der modellierten Anlage zur Trocknung und Pelletierung von Holz dargestellt. Die in Form von Holz hackschnitzeln vorliegende Biomasse wird zunächst im direkten Kontakt mit Rauchgasen getrocknet, in einer Hammermühle zerkleinert und anschließend einer Pelletierungsanlage zugeführt. Die zur Trocknung notwendige thermische Energie wird durch die Verbrennung eines Teilstroms der eingesetzten Holz hackschnitzel bereitgestellt. Nach dem Durchlaufen des Trockners wird der Heizgasstrom in einem

Zyklon von mitgerissenen Feststoffpartikeln befreit. Nach einem zur Überwindung der Druckverluste installierten Gebläse durchströmt der Heizgasstrom einen Luftvorwärmer, um die enthaltene thermische Restenergie zu nutzen.

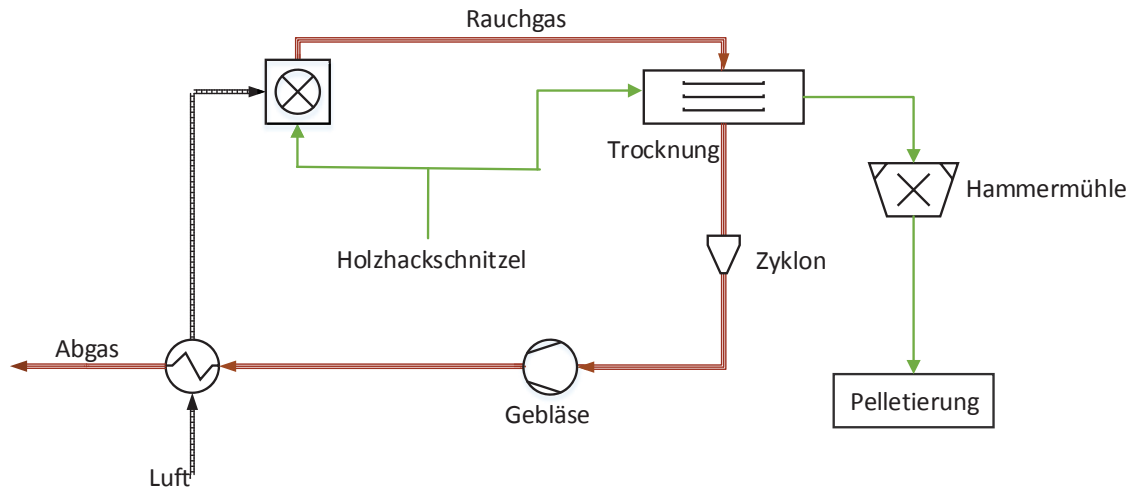


Abbildung 5.10: Vereinfachtes Prozessschaltbild der eigenständigen Anlage zur Trocknung und Pelletierung von Holz – Import_AWL0

Anlage zur Trocknung, Torrefizierung und Pelletierung von Holz – Varianten Import_AWL15/30

Die Erweiterung der vorgestellten Anlage zur Trocknung und Pelletierung durch einen Torrefizierungsprozess ist in Abbildung 5.11 dargestellt. Zusätzlich zu den in Abbildung 5.10 verwendeten Komponenten kommt ein Vorbrecher und ein Torrefizierungsreaktor zum Einsatz. Die zur Beheizung von Trockner und Torrefizierungsreaktor eingesetzten Rauchgase werden durch Verbrennung eines Teilstroms der Holzhackschnitzel und des Torrefizierungs-gases in einer Brennkammer generiert und zunächst dem Torrefizierungsreaktor zugeführt. Nach dem Verlassen des Torrefizierungsreaktors können die Rauchgase bei niedrigen Wassergehalten der Biomasse den Wärmebedarf im Trockner möglicherweise vollständig bereitstellen. Bei höheren Wassergehalten wird den bereits teilweise abgekühlten Rauchgasen aus dem Torrefizierungsreaktor Rauchgas aus der Brennkammer beigemischt, um die erforderliche Trocknungsleistung bereitstellen zu können. In Abhängigkeit vom erreichten Torrefizierungsgrad werden diese Varianten mit der Kurzbezeichnung Import_AWL15 bzw. Import AWL 30 bezeichnet, der jeweilige Torrefizierungsgrad liegt bei 15% bzw. 30%.

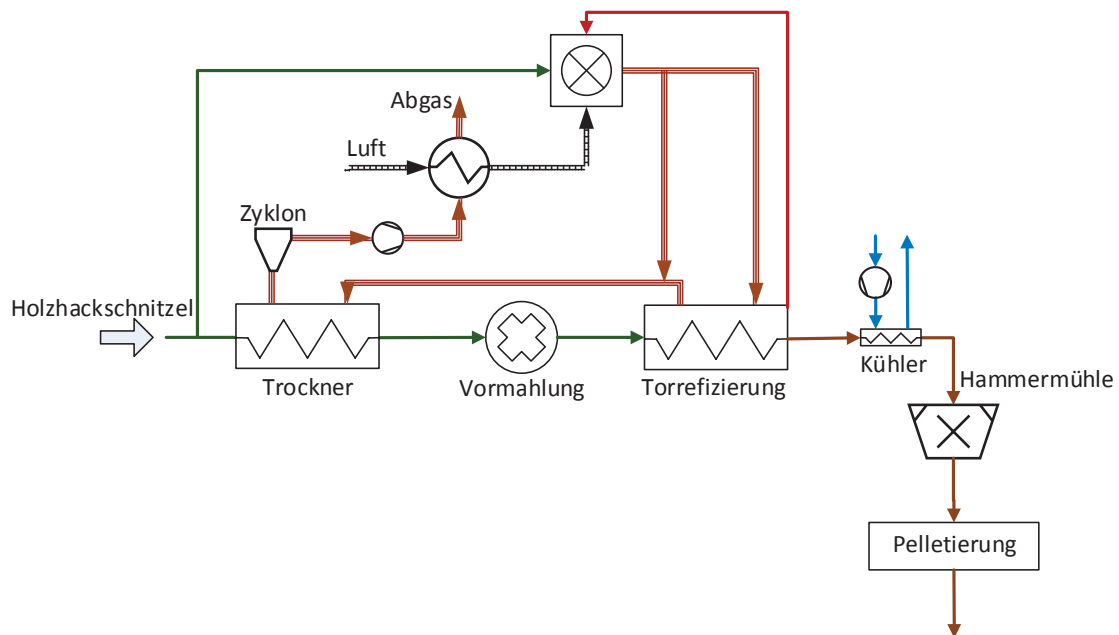


Abbildung 5.11: Vereinfachtes Prozessschaltbild der eigenständigen Anlage zur Trocknung, Torrefizierung und Pelletierung von Holz – Varianten Import_AWL15/30

Verbrennung im Kraftwerk

Nach der Vorbehandlung und dem Transport zum Kraftwerk erfolgt bei allen Importvarianten die Verbrennung der Biomasse zusammen mit Steinkohle. Dazu wird das Basismodell des Kraftwerks analog zu der in Abbildung 5.8 dargestellten Variante mit integrierter Vorbehandlung mit einer Hammermühle, entsprechenden Luftleitungen und einem Gebläse ergänzt. Ein vereinfachtes Prozessschaltbild der Anlage ist in Abbildung 0.1 in Anhang A.1 dargestellt.

Diese Modellvariante wird in Kapitel 6 außerdem zur Ermittlung der Auswirkungen einer direkten Mitverbrennung von extern vorbehandelter Biomasse auf den Kraftwerksprozess ohne integrierte Vorbehandlung ausgewertet.

6 ERGEBNISSE

In diesem Kapitel werden die durch Simulationsrechnungen unter Verwendung der vorgestellten Modelle ermittelten Ergebnisse dargestellt und erläutert. Zunächst wird auf Ergebnisse der Teilmodelle Dampfkraftwerk und Torrefizierung eingegangen. Im Anschluss werden die Ergebnisse der Vorbehandlung in Einzelanlagen und der Gesamtprozesssimulationen mit integrierter Vorbehandlung diskutiert. Zudem erfolgt ein Vergleich von allen betrachteten Varianten anhand der energetischen Effizienz und der spezifischen CO₂-Emissionen.

Im Kraftwerksprozess wird bei allen Betrachtungen die Feuerungswärmeleistung des Dampferzeugers konstant gehalten. Die jeweilige Mitverbrennungsrate wird als Anteil der Feuerungswärmeleistung aus Biomasse an der Gesamtfeuerungswärmeleistung in Prozent definiert. Der entsprechende Bilanzkreis für die Festlegung der Feuerungswärmeleistung und der Mitverbrennungsrate wird demnach um den Dampferzeuger gezogen.

6.1 Ergebnisse der Teilmodelle

Zur Verdeutlichung des Einflusses der Mitverbrennung von Biomasse auf einen Kraftwerksprozess wird der modellierte Kraftwerksprozess zunächst mit extern vorbehandelter Biomasse ausgewertet, ohne die Vorbehandlung weiter zu betrachten. Die Anpassung des zu Grunde liegenden Kraftwerksprozesses beschränkt sich dabei auf die Ergänzung einer Biomassemühle und deren luftseitige Einbindung in den Gesamtprozess, vgl. Abbildung 0.1 in Anhang A.1. Im Anschluss werden die Ergebnisse der Simulationsrechnungen des modellierten Torrefizierungsreaktors vorgestellt.

6.1.1 Dampfkraftwerk

Dampferzeuger

Zur Ermittlung des Einflusses der Mitverbrennung von extern vorbehandelter Biomasse auf den Dampferzeuger wird das entsprechende Modell mit zwei unterschiedlich intensiv torrefizierten Holzpellets (AWL 15% und 30%) sowie mit nicht torrefizierten Holzpellets bei unterschiedlichen Mitverbrennungsraten ausgewertet. Die Mitverbrennung von extern vorbehandelter Biomasse ohne

weitere Vorbehandlung am Kraftwerksstandort wird im Allgemeinen als direkte Mitverbrennung bezeichnet.

In Abbildung 6.1 sind beispielhaft die in den jeweiligen Heizflächen des Dampferzeugers übertragenen Wärmemengen bei der Mitverbrennung von Holzpellets mit einem Torrefizierungsgrad von 15% für verschiedene Mitverbrennungsraten dargestellt. Durch eine Absenkung der Flammentemperatur mit zunehmender Mitverbrennungsrates und die Annahme einer konstanten Feuerraumendtemperatur kommt es mit zunehmender Mitverbrennungsrates zu einer Absenkung der im Feuerraum übertragenen Wärmemenge. Die Wärmeübertragung im Dampferzeuger verschiebt sich dementsprechend in die konvektiven Heizflächen.

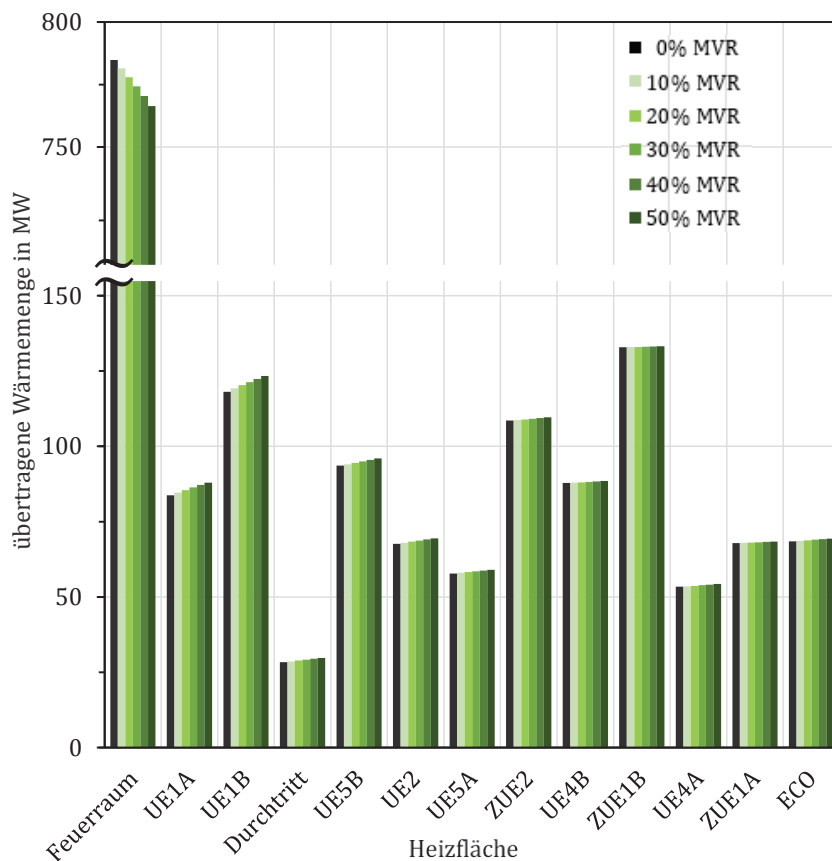


Abbildung 6.1: In den Heizflächen des Dampferzeugers auf die Wasser-/Dampfseite übertragene Wärmemengen bei der Mitverbrennung von torrefizierten Holzpellets (AWL = 15%) für verschiedene Mitverbrennungsrates

Bezüglich der für den Gesamtprozess wichtigen Schnittstellenparameter Rauchgastemperatur am Kesselaustritt und Frischdampfmassenstrom ergeben sich für die untersuchten Brennstoffe im Vergleich zum Kohlebetrieb die in Tabelle 6.1 dargestellten Änderungen. Die Frischdampftemperatur und die ZÜ-Dampftemperatur werden durch Regelung und Wassereinspritzung bei allen Mitverbrennungsraten konstant gehalten.

Tabelle 6.1: Änderung des Frischdampfmassenstroms und der Rauchgastemperatur am Austritt des Dampferzeugers infolge der Mitverbrennung von Biomasse für verschiedene Brennstoffe bei einer Mitverbrennungsrate von 50%

Brennstoff	Änderung des Frischdampfmassenstroms in %	Änderung der Rauchgastemperatur in K
Holzpellets 10% H ₂ O	- 0,39	-0,5
torrefizierte Holzpellets AWL 15%	+0,05	-0,3
torrefizierte Holzpellets AWL 30%	+0,31	-0,2

Die Auswirkungen der Mitverbrennung auf die genannten Parameter sind bei allen untersuchten Brennstoffen gering. Die Veränderungen des Frischdampfmassenstroms werden im Gesamtprozessmodell berücksichtigt. Der Einfluss auf die Rauchgasaustrittstemperaturen ist vor allem bei den torrefizierten Brennstoffen sehr gering und wird in den weiteren Betrachtungen vernachlässigt.

Gesamtprozess der Kraftwerksanlage

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Simulationsrechnungen für den Gesamtprozess des Kraftwerks bei Mitverbrennung von extern vorbehandelter Biomasse dargestellt. Die Ergebnisse zeigen somit das Verhalten der Kraftwerksanlage für die Varianten mit importierter Biomasse und liefern zusätzlich wichtige Erklärungsansätze für die in Kapitel 6.3 dargestellten Ergebnisse des Gesamtprozesses mit in den Kraftwerksprozess integrierter Vorbehandlung der Biomasse.

In Abbildung 6.2 und Abbildung 6.3 sind die Leistungen und Wirkungsgrade der Kraftwerksanlage bei der Mitverbrennung von Holzpellets mit AWL15% und AWL30% sowie von nicht torrefizierten Holzpellets dargestellt. In beiden Abbildungen wird deutlich, dass der Verlauf von Leistung und Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Mitverbrennungsrate stark davon abhängt, ob die Biomasse vor der Mitverbrennung durch Torrefizierung vorbehandelt wird oder nicht. Bei einer Mitverbrennungsrate von 50% sinkt der Nettowirkungsgrad der

Kraftwerksanlage durch die Mitverbrennung von nicht torrefizierten Holzpellets um etwa 0,7 %-Pkte und durch die Mitverbrennung von torrefizierten Holzpellets mit AWL15% um etwa 0,2%-Pkte. Bei der Mitverbrennung torrefizierter Holzpellets mit AWL30% bleibt der Nettowirkungsgrad im Vergleich zum Kohlebetrieb annähernd konstant.

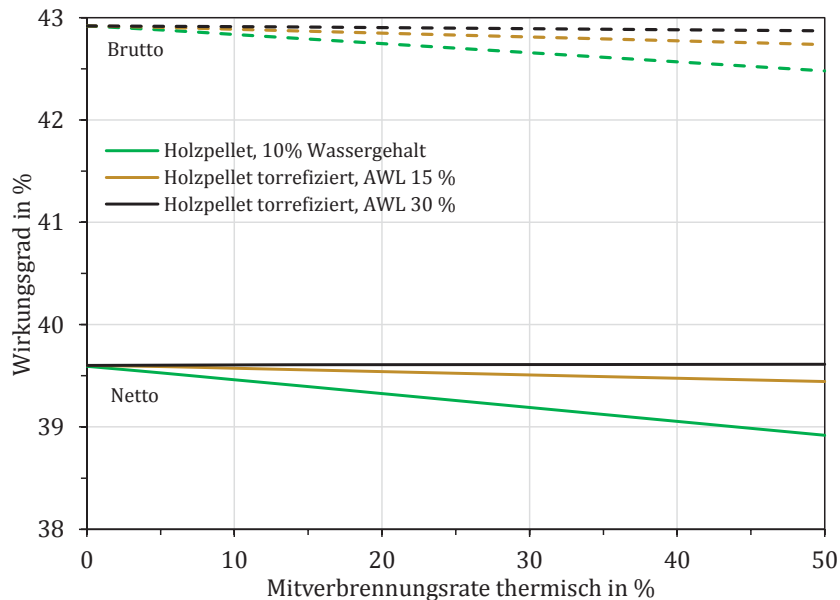


Abbildung 6.2: Brutto- und Nettowirkungsgrad der Kraftwerksanlage bei der direkten Mitverbrennung von torrefizierten sowie von nicht torrefizierten Holzpellets in Abhängigkeit von der Mitverbrennungsrate

Analog dazu verhalten sich auch die in Abbildung 6.3 dargestellten Leistungen. Um die Zusammenhänge, die zu diesem Verhalten führen, zu erläutern, erfolgt ein Blick auf die Parameter Kesselwirkungsgrad und Eigenbedarf.

In Abbildung 6.4 sind die nach DIN EN 12952-15 für alle drei untersuchten Brennstoffe ermittelten Kesselwirkungsgrade und die Temperaturen der Rauchgase am Austritt des Luftvorwärmers in Abhängigkeit von der Mitverbrennungsrate aufgetragen. Bei der Mitverbrennung von nicht torrefizierten Holzpellets kommt es mit zunehmender Mitverbrennungsrate durch eine Erhöhung der Rauchgastemperatur zu erhöhten Abgasverlusten und damit zu einer Absenkung des Kesselwirkungsgrads. Bei den Holzpellets mit AWL15% ist dieser Effekt in abgeschwächter Form ebenfalls zu erkennen. Bei den Holzpellets mit AWL30%

kommt es dagegen zu einer geringfügigen Absenkung der Rauchgastemperaturen und somit zu einer geringfügigen Erhöhung des Kesselwirkungsgrads.

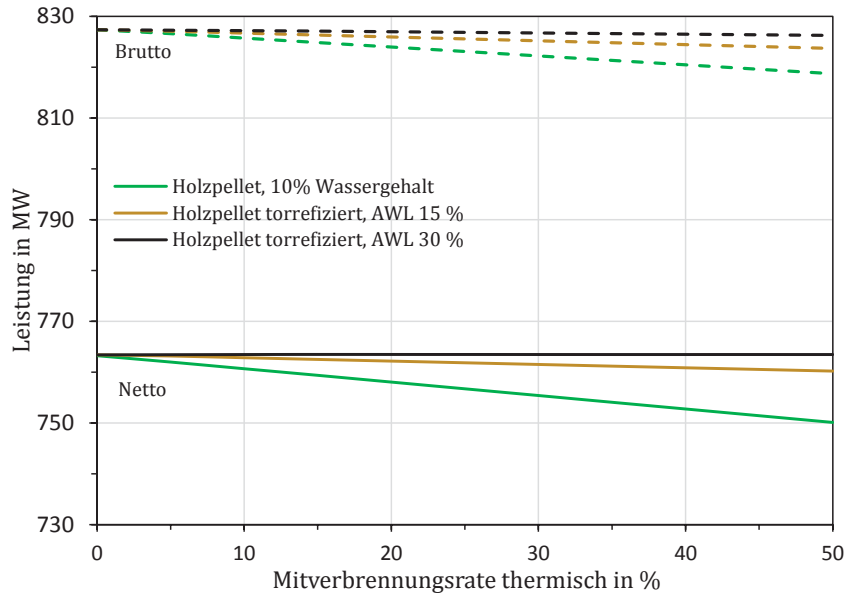


Abbildung 6.3: Brutto- und Nettoleistung der Kraftwerksanlage bei der direkten Mitverbrennung von torrefizierten sowie von nicht torrefizierten Holzpellets in Abhängigkeit von der Mitverbrennungsrate

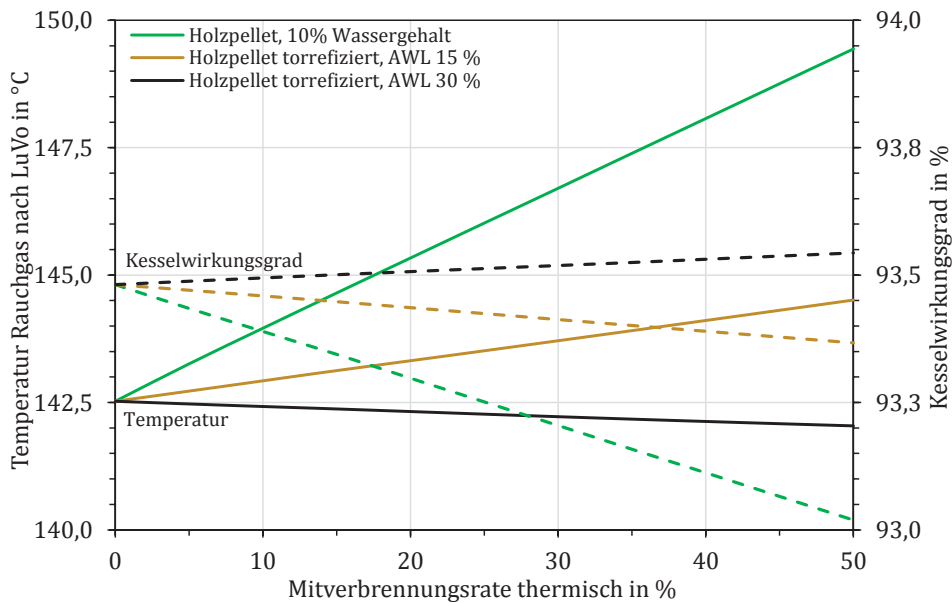


Abbildung 6.4: Kesselwirkungsgrad und Temperatur der Rauchgase am Austritt des Luftvorwärmers bei der direkten Mitverbrennung von torrefizierten sowie von nicht torrefizierten Holzpellets in Abhängigkeit von der Mitverbrennungsrate

Die Veränderungen der Rauchgastemperaturen am Austritt des Luftvorwärmers ergeben sich im Wesentlichen aus den in Abbildung 6.5 dargestellten Mengen an Rauchgas und Verbrennungsluft. Der im Vergleich zur Steinkohle höhere Sauerstoffgehalt der Biomassen führt bei zunehmender Mitverbrennungsrate zu einer Absenkung der benötigten Verbrennungsluftmenge. Durch das Austreiben von sauerstoffreichen Komponenten bei der Torrefizierung wird dieser Effekt bei den torrefizierten Biomassen abgeschwächt, sodass der Bedarf an Verbrennungsluft mit steigendem AWL zunimmt. Mit dem entstehenden Rauchgasmassenstroms verhält es sich gerade umgekehrt: Mit steigendem AWL nimmt der Rauchgasmassenstrom ab, sodass er bei der torrefizierten Biomasse mit AWL30% nahezu dem bei reinem Steinkohlebetrieb entspricht. Die stark gegenläufige Entwicklung von Luft und Rauchgasmassenstrom führt insbesondere bei nicht torrefizierten Holzpellets, aber auch bei den torrefizierten Holzpellets mit AWL15%, zu einer Absenkung der im Luftvorwärmer übertragenen Energiemenge und infolge dessen zu der in Abbildung 6.4 dargestellten Erhöhung der Rauchgastemperaturen und zu einer Absenkung der Kesselwirkungsgrade für nicht torrefizierte Holzpellets und für torrefizierte Holzpellets mit AWL15%.

Neben den Rauchgastemperaturen wirken sich außerdem die unterschiedlichen Wassergehalte der Holzbrennstoffe auf die Kesselwirkungsgrade aus. Die Mitverbrennung von Holzpellets mit 10% Wassergehalt führt zu höheren Abgasverlusten und dadurch zu niedrigeren Kesselwirkungsgraden als die Mitverbrennung der torrefizierten Biomasse mit 4% Wassergehalt.

Zudem wirkt sich die Mitverbrennung auf den Eigenbedarf der Kraftwerksanlage und die dargestellten Nettowirkungsgrade und Nettoleistungen des Gesamtprozesses aus, vgl. Abbildung 6.6. Die Mahlung von Holzpellets führt zu einer Erhöhung des Mahlaufwands. Durch Torrefizierung kann dieser Eigenbedarfsanteil jedoch auf die Größenordnung wie bei der Mahlung von Steinkohle gesenkt werden. Zudem führt die Absenkung des Massenstroms notwendiger Verbrennungsluft zu einer Absenkung des Eigenbedarfs beim Frischlüfter. Dem stehen jedoch bei nicht torrefizierten Holzpellets eine entsprechende Erhöhung des Rauchgasmassenstroms und damit eine Zunahme des Eigenbedarfs im Saugzug entgegen. Bei den torrefizierten Brennstoffen ergeben sich aufgrund der nur geringfügig veränderten Rauchgasmassenströme bei sinkenden Verbrennungsluftmassenströmen Vorteile beim Eigenbedarf.

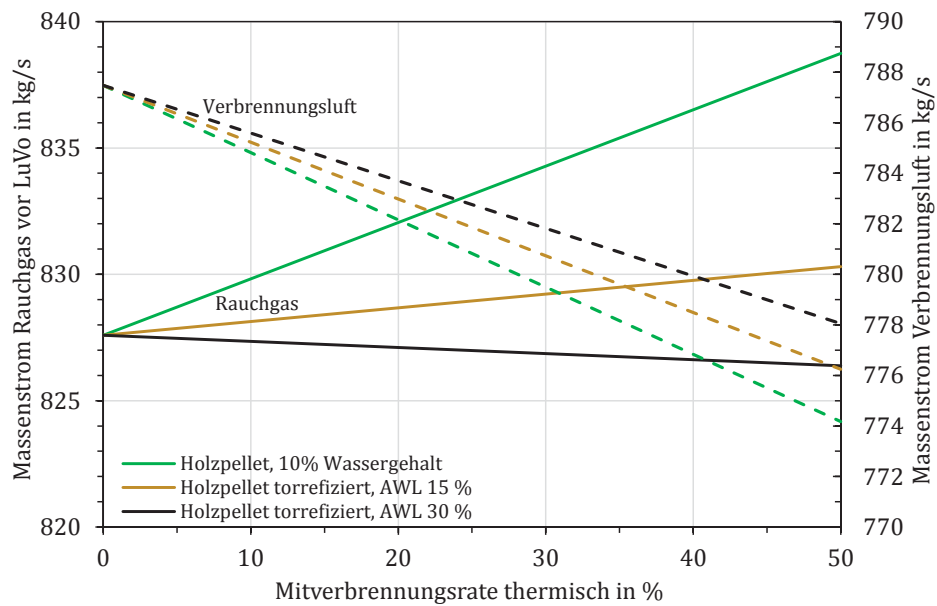


Abbildung 6.5: Massenströme Rauchgas und Verbrennungsluft bei der direkten Mitverbrennung von torrefizierten sowie von nicht torrefizierten Holzpellets in Abhängigkeit von der Mitverbrennungsrate

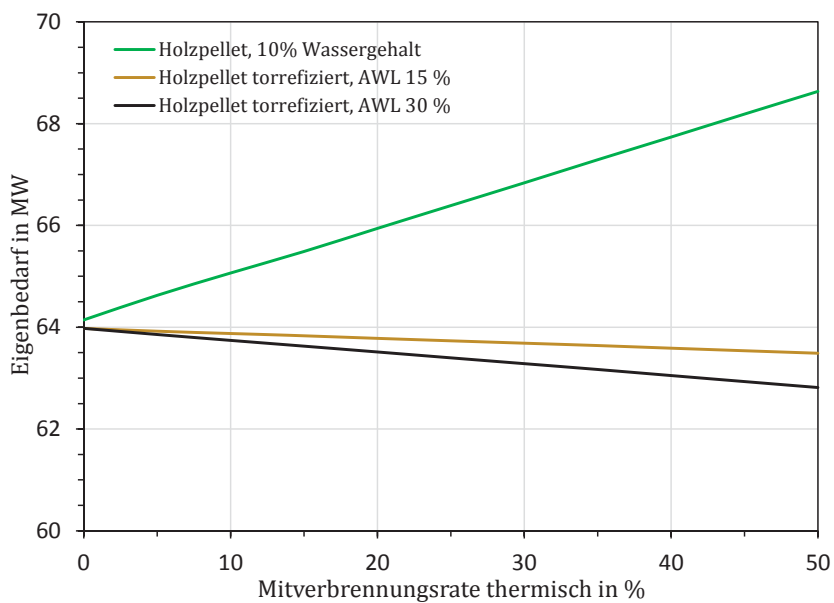


Abbildung 6.6: Eigenbedarf der Kraftwerksanlage bei der direkten Mitverbrennung von torrefizierten sowie von nicht torrefizierten Holzpellets in Abhängigkeit von der Mitverbrennungsrate

6.1.2 Torrefizierungsreaktor

Im Folgenden werden die Ergebnisse der modellierten Torrefizierungsreaktoren vorgestellt. In Abbildung 6.7 sind die Temperaturverläufe des Heizdampfes und des Holzes sowie der Torrefizierungsgrad in Abhängigkeit von der Reaktorlänge dargestellt. Dabei ist anzumerken, dass die Annahme einer konstanten axialen Partikelgeschwindigkeit im Reaktor dazu führt, dass die Reaktorlänge in Metern der Verweilzeit im Reaktor in Minuten geteilt durch zwei entspricht, eine Verweilzeit von 10 min entspricht somit einer Reaktorlänge von 5 m.

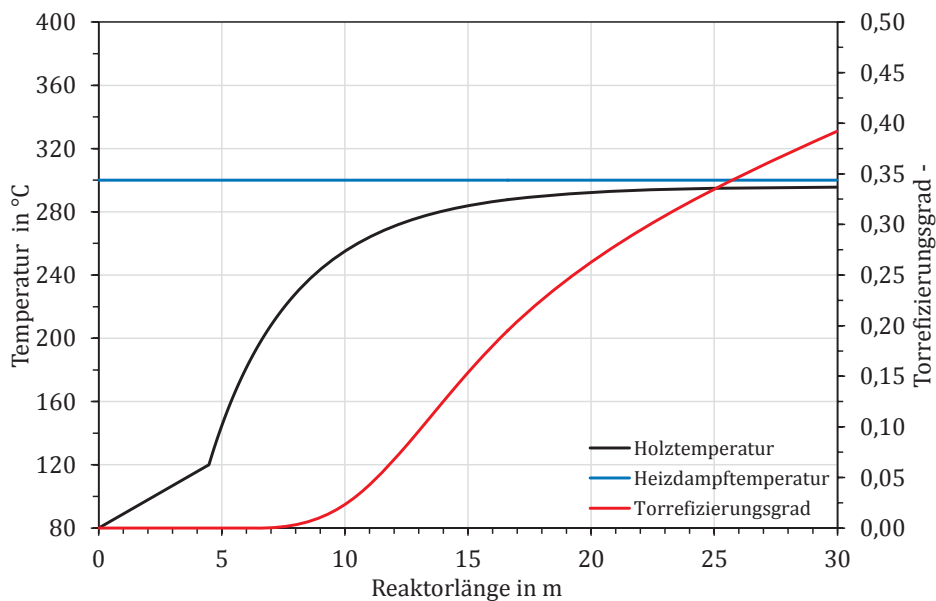


Abbildung 6.7: Heizdampftemperatur, Holztemperatur und Torrefizierungsgrad beim dampfbeheizten Reaktor in Abhängigkeit von der Reaktorlänge

Der Heizdampf wird vor dem Eintritt in den Torrefizierungsreaktor mittels Kondensateinspritzung gesättigt, die Wärmebereitstellung im Torrefizierungsreaktor erfolgt durch Kondensation. Dadurch ergibt sich für die gesamte Reaktorlänge eine konstante Temperatur des Heizmediums Dampf von 300 °C. Die Biomasse tritt nach zuvor erfolgter Vortrocknung auf 10 gew.-% Wassergehalt mit 80 °C in den Torrefizierungsreaktor ein. Der lineare Verlauf der Temperaturkurve bis zum Erreichen von 120 °C ergibt sich durch eine Annahme. In diesem Bereich wird der Restwassergehalt des Holzes vollständig in die Gasphase überführt. Nachdem die Holztemperatur 120 °C erreicht hat, erfolgt die weitere Aufwärmung der Biomasse in Abhängigkeit von den berechneten

Wärmeübergangswerten und der im jeweiligen Volumenelement auftretenden Temperaturdifferenz. Bei einem ausreichend langen Reaktor nähert sich die Holztemperatur der Temperatur des Heizmediums asymptotisch an. Die Torrefizierungsreaktionen setzen ein, nachdem die Holztemperatur 200 °C erreicht hat. Zu deutlich sichtbaren Torrefizierungseffekten kommt es aufgrund der starken Temperaturabhängigkeit der Torrefizierungsreaktionen jedoch erst ab etwa 240 °C und darüber.

Analog zu Abbildung 6.7 sind in Abbildung 6.8 die Verläufe der Temperaturen von Heizmedium und Holz sowie des Torrefizierungsgrads in Abhängigkeit von der Reaktorlänge für den rauchgasbeheizten Torrefizierungsreaktor dargestellt. Alle bei der dampfbeheizten Variante gemachten Angaben zur linearen Aufwärmung und Wasserverdampfung im ersten Reaktorabschnitt sowie zum Beginn der Torrefizierungsreaktion sind auch bei der rauchgasbeheizten Variante gültig. Aufgrund der Verwendung dieses Teilmodells sowohl bei der Einzelanlage zur Erzeugung torrefizierter Holzpellets als auch bei der im Kraftwerksprozess integrierten Vorbehandlung ergeben sich jeweils unterschiedliche Temperaturen auf der Heizgasseite. Bei der Einzelanlage wird in Anlehnung an den ACB Prozess der Firma Andritz [44] die Heizgastemperatur am Reaktoreintritt auf 400 °C und am Reaktoraustritt auf 300 °C festgelegt. Entsprechend ergeben sich die im Diagramm mit gestrichelten Linien dargestellten Verläufe für die Heizgas- bzw. Holztemperaturen und den Torrefizierungsgrad. Bei der im Kraftwerksprozess integrierten Variante kann die Heizgastemperatur am Reaktoreintritt nicht frei gewählt werden. Die zur Beheizung stromabwärts der Entstickungsanlage aus dem Kraftwerksprozess entnommenen Rauchgase weisen Temperaturen von etwa 360 °C auf und geben die Heizgastemperatur am Reaktoreintritt vor. Zur Vermeidung sehr hoher Heizgasmassenströme erfolgt außerdem eine Absenkung der Heizgasaustrittstemperatur auf 280 °C. Durch das höhere Temperaturniveau bei der Variante Einzelanlage kommt es im Vergleich zur Integrationsvariante zu einer deutlich schnelleren Aufheizung des Holzes und zu einer um etwa 20 K höheren Endtemperatur. Dadurch werden bei der Variante Einzelanlage bei gleicher Reaktorlänge deutlich höhere Torrefizierungsgrade erreicht als bei der Variante Integration.

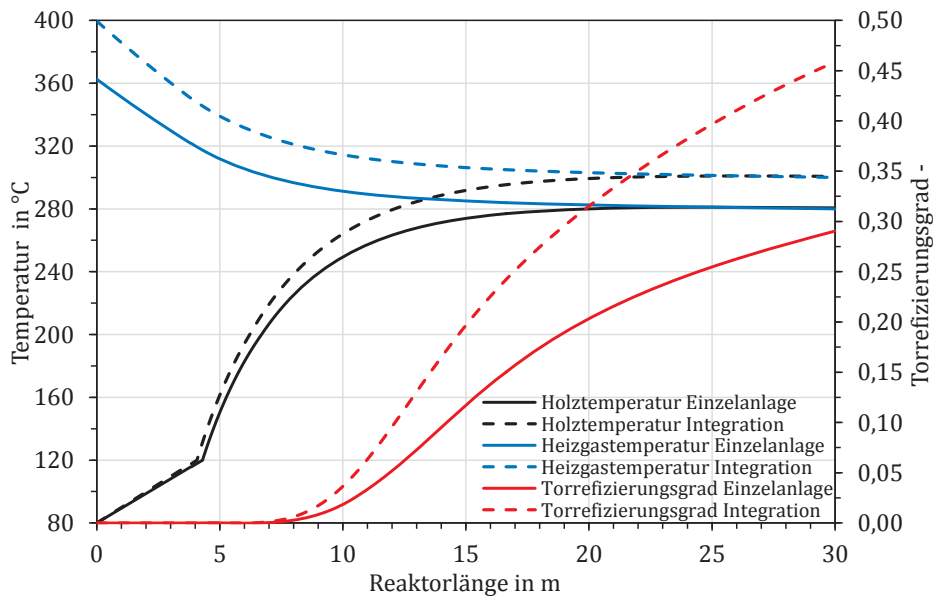


Abbildung 6.8: Heizgastemperatur, Holztemperatur und Torrefizierungsgrad beim rauchgasbeheizten Reaktor in Abhängigkeit von der Reaktorlänge; dargestellt für die Variante Einzelanlage und die Variante Integration

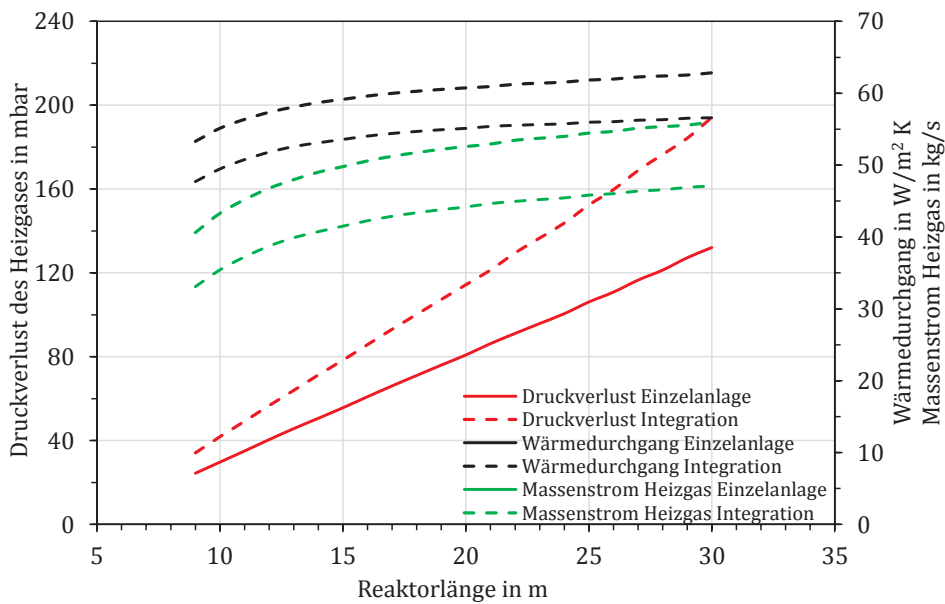


Abbildung 6.9: Heizgasmassenstrom, Druckverlust und Wärmedurchgang in Abhängigkeit von der Reaktorlänge

Bei der rauchgasbeheizten Reaktorvariante hängen Wärmeübergang und Druckverlust auf der Heizgasseite stark vom jeweiligen Heizgasmassenstrom ab. Alle drei genannten Größen sind in Abbildung 6.9 in Abhängigkeit von der Reaktorlänge dargestellt. Bedingt durch die geringere Temperaturdifferenz des Heizgases vom Eintritt bis zum Austritt ergeben sich bei der Integrationsvariante höhere Heizgasmassenströme und damit auch höhere Wärmedurchgangswerte und Druckverluste als bei der Variante Einzelanlage.

Weitere Ergebnisse des Torrefizierungsreaktormodells zur elementaren Verteilung der eingesetzten Biomasse auf festes und gasförmiges Produkt, zu den im gasförmigen Produkt enthaltenen molekularen Spezies und zu den Heizwerten im festen und gasförmigen Produkt in Abhängigkeit von der Reaktorlänge sind in Anhang A.2 dargestellt.

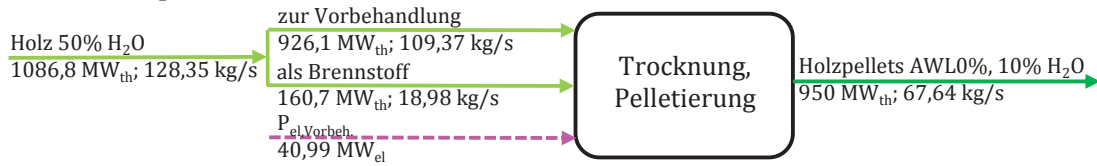
6.2 Vorbehandlung in Einzelanlagen

Zur Vervollständigung der Betrachtungen zur Mitverbrennung ohne integrierte Vorbehandlung in Kapitel 6.1.1 werden im Folgenden die Ergebnisse der Vorbehandlung in Einzelanlagen vorgestellt.

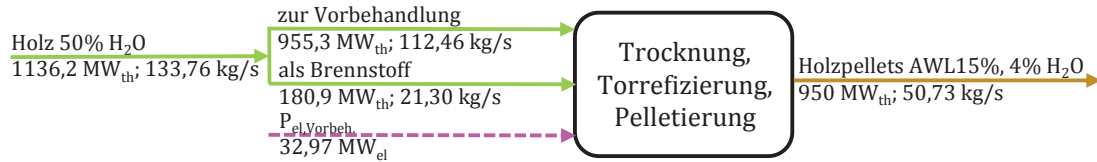
Bei allen untersuchten Gesamtvarianten wird die dem Kraftwerksprozess zugeführte Feuerungswärmeleistung konstant gehalten; sie beträgt bei der untersuchten Kraftwerksanlage im Volllastbetrieb etwa $1900 \text{ MW}_{\text{th}}$. Bei einer Mitverbrennungsrate von 50% wird die Hälfte der Feuerungswärmeleistung und damit etwa $950 \text{ MW}_{\text{th}}$ durch Biomasse bereitgestellt, unabhängig davon wie die Biomasse vorbehandelt wird. Die zur Erzeugung eines entsprechenden Brennstoffmassenstroms notwendigen Rohholzmassenströme und die erforderlichen elektrischen Leistungen sind für alle Importvarianten in Abbildung 6.10 dargestellt.

Zur Verdeutlichung des zusätzlichen Biomassebedarfs zur Beheizung von Trocknung und Torrefizierung ist der insgesamt erforderliche Rohholzmassenstrom in zwei Teilströme aufgeteilt. Der Teilstrom „zur Vorbehandlung“ durchläuft die Vorbehandlungsanlage, der Teilstrom „als Brennstoff“ wird zur Erzeugung der notwendigen Prozesswärme verbrannt.

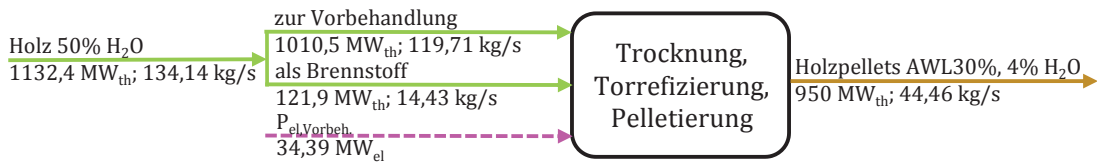
Variante Import_AWL0



Variante Import_AWL15



Variante Import_AWL30



- Holz, erntefrisch, 50% Wassergehalt
- Holzpellets, 10% Wassergehalt
- Holzpellets, Torrefizierungsgrad 15%/30%, 4% Wassergehalt
- - - Elektrischer Strom

Abbildung 6.10: Energie- und Massenströme zur Erzeugung eines Brennstoffmassenstroms mit einer Feuerungswärmeleistung von 950 MW_{th} in Einzelanlagen für alle untersuchten Importvarianten

Bereits bei Variante Import_AWL0 wird zur Bereitstellung der thermischen Energie ein erheblicher Massenstrom zusätzlicher Biomasse erforderlich. Dieser zusätzliche Holzbedarf steigt bei Variante Import_AWL15 durch den zusätzlichen Wärmebedarf der Torrefizierung weiter an. Bei Variante Import_AWL30 steigt der zusätzliche Biomassemassenstrom im Vergleich zu Variante AWL15 nur geringfügig an. Der höhere Bedarf an Rohholz zur Vorbehandlung kann durch die Nutzung der entstehenden Torrefizierungsgase und die daraus folgende Absenkung des Rohholzbedarfs zur Wärmebereitstellung annähernd ausgeglichen werden. Der insgesamt erforderliche Biomassemassenstrom ist bei den Varianten Import_AWL15 und Import_AWL30 aber vergleichbar groß.

Zudem kommt bei der Vorbehandlung in Einzelanlagen elektrische Energie zum Betrieb von Pelletpressen, Mühlen, Gebläsen, Pumpen, Dreheinrichtungen und dergleichen zum Einsatz. Bei Variante Import_AWL0 kommt es daher zu einer

Leistungsaufnahme von etwa 41 MW_{el}. Durch den zusätzlichen Verbrauch des Torrefizierungsreaktors und entsprechender Nebenaggregate kommt es bei den Varianten Import_AWL15 und Import_AWL30 zu einer Erhöhung der Leistungsaufnahme. Allerdings erfolgt die Feinmahlung der torrefizierten Biomassen erst nach der Torrefizierung. Dadurch sind der spezifische Mahlaufwand und der Massenstrom an Biomasse deutlich geringer. Die elektrische Leistungsaufnahme bei den Varianten Import_AWL15 und Import_AWL30 sinkt deshalb im Vergleich zu Variante Import_AWL0.

In Anhang A.6 sind zusätzlich Abbildungen zum Energiebedarf der Vorbehandlung in Einzelanlagen dargestellt. Die Abbildungen zeigen den spezifischen themischen sowie den spezifischen elektrischen Energiebedarf der einzelnen Vorbehandlungsschritte zur Erzeugung eines Kilogramms Brennstoff.

Durch die Verknüpfung der hier dargestellten Ergebnisse zur Vorbehandlung in Einzelanlagen und der in Kapitel 6.1.1 dargestellten Ergebnisse zur Mitverbrennung von extern vorbehandelter Biomasse in einem Kraftwerksprozess können die energetischen Effizienzen der Importvarianten ermittelt werden. Die Darstellung dieser Ergebnisse und ein Vergleich mit den Ergebnissen der untersuchten Varianten mit integrierter Vorbehandlung erfolgt in Kapitel 6.4.

6.3 Vorbehandlung integriert in den Kraftwerksprozess

Im Folgenden werden die Ergebnisse der durchgeführten Gesamtprozessbetrachtungen mit in den Kraftwerksprozess integrierter Vorbehandlung von Biomasse dargestellt und erläutert. Dabei wird für jede untersuchte Variante ein optimierter Torrefizierungsgrad mit maximalen Werten bezüglich Leistung und energetischer Effizienz identifiziert. Die Ergebnisse dieser optimalen Betriebspunkte werden in Kapitel 6.4 mit den Ergebnissen der Importvarianten verglichen.

Nach den Ergebnissen der dampfbeheizten Varianten folgen die Ergebnisse der rauchgasbeheizten Variante und eine Übersicht über die jeweiligen Auswirkungen der einzelnen Vorbehandlungsschritte auf Leistung und energetische Effizienz des Gesamtprozesses.

6.3.1 Dampfbeheizte Torrefizierung

Dampfbeheizt, ohne zusätzliche Holzvorwärmung – Variante IntegDampf_AWL

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Gesamtprozesssimulation mit integrierter, frischdampfbeheizter Torrefizierung dargestellt. Die Ergebnisse bezüglich Brutto- und Nettoleistung sind in Abhängigkeit vom Torrefizierungsgrad für verschiedene Mitverbrennungsraten in Abbildung 6.11 dargestellt.

Bedingt durch die von der Mitverbrennungsraten abhängige Dampfentnahme zur Beheizung von Trocknung und Torrefizierung, liegen die Kurven für die Brutto- und Nettoleistung mit zunehmender Mitverbrennungsraten auf immer niedrigerem Niveau.

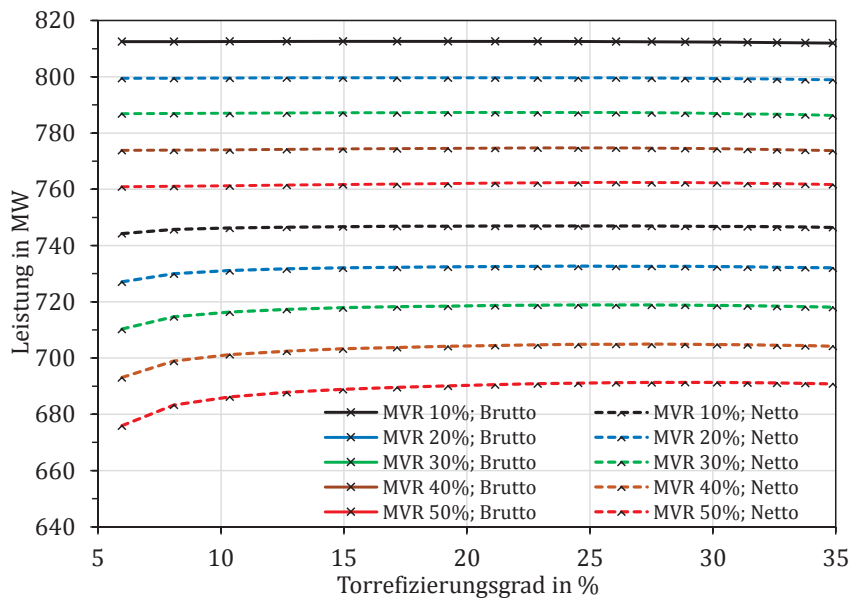


Abbildung 6.11: Netto- und Bruttoleistung der Kraftwerksanlage mit integrierter, dampfbeheizter Torrefizierung für verschiedene Mitverbrennungsraten und Torrefizierungsgrade – Variante IntegDampf_AWL

Die Kurven der Bruttoleistung steigen bei konstanter Mitverbrennungsraten mit zunehmendem Torrefizierungsgrad leicht an, weil sich der Kesselwirkungsgrad erhöht; die Kesselwirkungsgrade verhalten sich analog zu den in Kapitel 6.1.1 vorgestellten Ergebnissen und sind in Abbildung 6.12 dargestellt. Mit zunehmendem Torrefizierungsgrad steigen die Kesselwirkungsgrade bei konstanter

Mitverbrennungsrate; die Steigung der Geraden nimmt entsprechend der jeweiligen Mitverbrennungsrate zu.

Die Kurven der Nettoleistung bei konstanter Mitverbrennungsrate steigen mit zunehmendem Torrefizierungsgrad zunächst an (Abbildung 6.11). Dieser Anstieg ist bei geringen Torrefizierungsgraden auf die Reduzierung des Mahlaufwands und somit des Eigenbedarfs insgesamt zurückzuführen, vgl. Abbildung 6.13. Bei weiter zunehmenden Torrefizierungsgraden ergeben sich beim Eigenbedarf zunehmend weniger Vorteile durch die Reduzierung des Mahlaufwands. Gleichzeitig kommt es durch den zunehmenden Bedarf an Heizdampf für den Torrefizierungsreaktor zu einem Mehraufwand. Entsprechend erreichen die Kurven der Nettowirkungsgrade bei einem Torrefizierungsgrad von etwa 30% ein Maximum und sinken bei weiterer Steigerung des Torrefizierungsgrads wieder leicht ab.

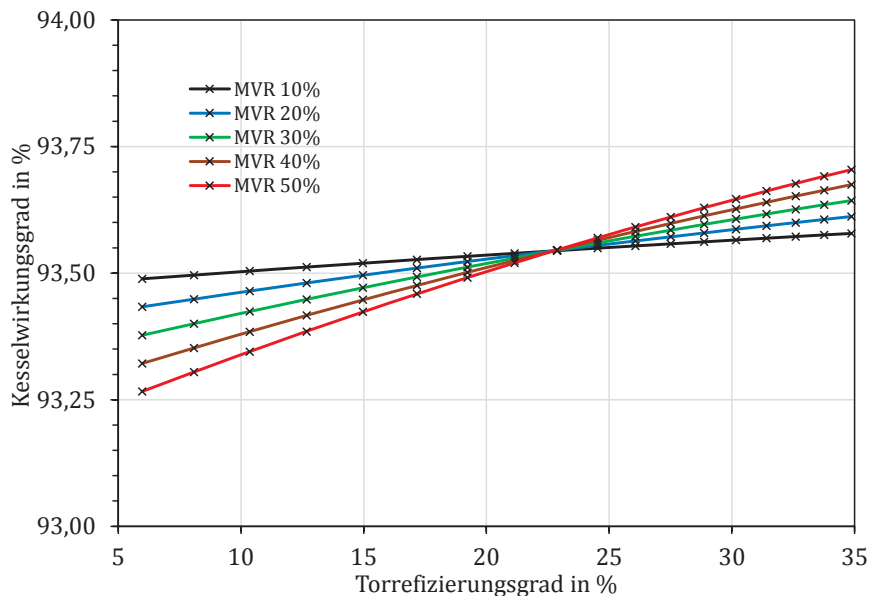


Abbildung 6.12: Kesselwirkungsgrad der Kraftwerksanlage mit integrierter, dampfbeheizter Torrefizierung für verschiedene Mitverbrennungsraten und Torrefizierungsgrade - Variante IntegDampf_AWL

Auch bei den in Abbildung 6.14 dargestellten energetischen Effizienzen liegen die Kurven mit steigenden Mitverbrennungsraten auf einem immer niedrigeren Niveau, weil mit der Mitverbrennungsrate auch die Dampfentnahme zunimmt. Bei konstanter Mitverbrennungsrate steigen die Werte sowohl bei der Brutto- als auch bei der Nettoeffizienz mit zunehmendem Torrefizierungsgrad zunächst an. Basierend auf den bereits beschriebenen Zusammenhängen kommt es auch hier zur

Ausbildung von Maxima im Bereich eines Torrefizierungsgrads von etwa 30%. Somit wird für diese Variante ein optimaler Torrefizierungsgrad von 30% identifiziert. Entsprechend ergibt sich die nun vollständige Kurzbezeichnung dieser Variante zu IntegDampf_AWL30.

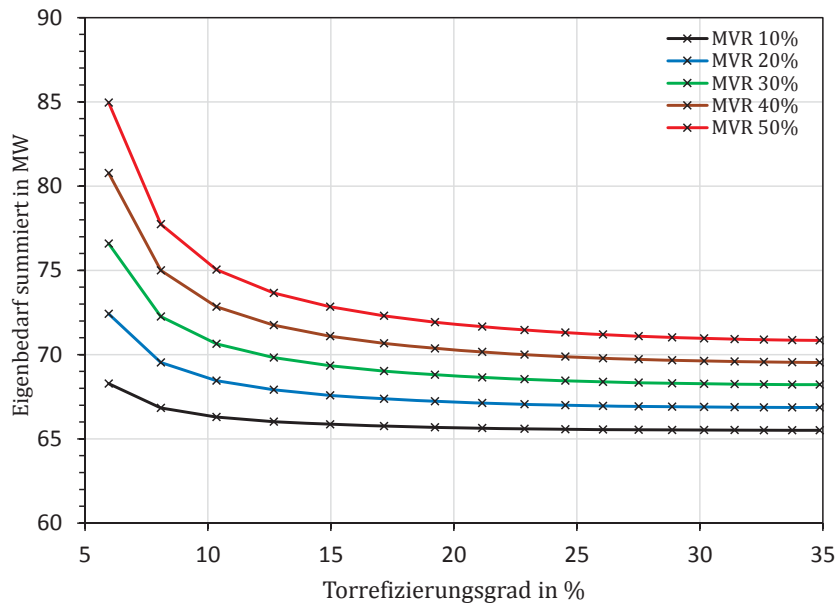


Abbildung 6.13: Eigenbedarf der Kraftwerksanlage mit integrierter, dampfbeheizter Torrefizierung für verschiedene Mitverbrennungsraten und Torrefizierungsgrade – Variante IntegDampf_AWL

Die jeweiligen Heizdampfmengen zum Betrieb von Trocknung und Torrefizierung sowie die spezifischen CO₂-Emissionen sind für alle untersuchten Mitverbrennungsraten und Torrefizierungsgrade in Anhang 3 dargestellt.

Dampfbeheizt – mit zusätzlicher Holzvorwärmung – Variante IntegDampfVW_AWL

Bei dieser Variante kommt ein zusätzlicher, mit Dampf aus der kalten Zwischenüberhitzung beheizter Reaktor zur Vorwärmung und Endtrocknung des Holzes zwischen den Verfahrensschritten Trocknung auf 10 % Wassergehalt und Torrefizierung zum Einsatz. Dadurch können Leistung und energetische Effizienz des Gesamtprozesses gegenüber der Variante ohne zusätzliche Holzvorwärmung gesteigert werden. Dabei wird das Holz auf eine Temperatur von 200 °C vorgewärmt und somit noch vor dem Einsetzen erster Torrefizierungreaktionen in den Torrefizierungsreaktor gefördert. Da daher keine Inertisierung notwendig ist, kann

der Vorwärmreaktor mit Luft gespült werden. Aufgrund der im Vergleich zum Torrefizierungsreaktor niedrigeren Grädigkeit im Vorwärmer verlängert sich die insgesamt zur Vorwärmung und Torrefizierung erforderliche Reaktorlänge um etwa 3 m und es kommt zu geringfügig ansteigenden Wärmeverlusten über die Reaktoroberflächen. Wie bei Variante IntegDampf_AWL30 kann auch bei Variante IntegDampfVW_AWL ein optimaler Torrefizierungsgrad von etwa 30% identifiziert werden. Entsprechend wird die Kurzbezeichnung zu IntegDampfVW_AWL30 ergänzt.

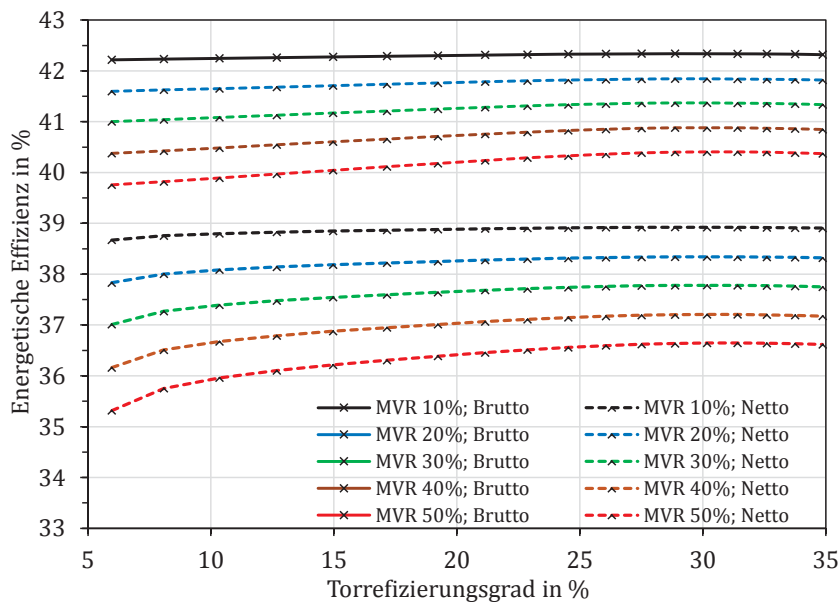


Abbildung 6.14: Energetische Effizienz der Kraftwerksanlage mit integrierter, dampfbeheizter Torrefizierung für verschiedene Mitverbrennungsraten und Torrefizierungsgrade - Variante IntegDampf_AWL

Die Ergebnisse für Leistung und energetische Effizienz sowie die Heizdampfmassenströme zur Trocknung, Vorwärmung und Torrefizierung sind in Anhang A.4 dargestellt. Im Folgenden werden die Differenzen zwischen den Ergebnissen der dampfbeheizten Variante mit zusätzlichem Holzvorwärmer und der dampfbeheizten Variante ohne Vorwärmer erläutert.

Vergleich der dampfbeheizten Varianten - mit und ohne zusätzliche Holzvorwärmung - IntegDampf_AWL30 vs. IntegDampfVW_AWL30

Durch den Einsatz eines mit kaltem ZÜ-Dampf betriebenen Holzvorwärmers kann die vollständige, zur Endtrocknung notwendige thermische Energie und etwa die Hälfte der zur Aufheizung des Holzes im Torrefizierungsreaktor benötigten

thermischen Energie durch Anzapfdampf aus der kalten Zwischenüberhitzung bereitgestellt werden. Dadurch kommt es zu einer deutlichen Reduktion der erforderlichen Frischdampfmenge für die Beheizung des Torrefizierungsreaktors, siehe Abbildung 6.15.

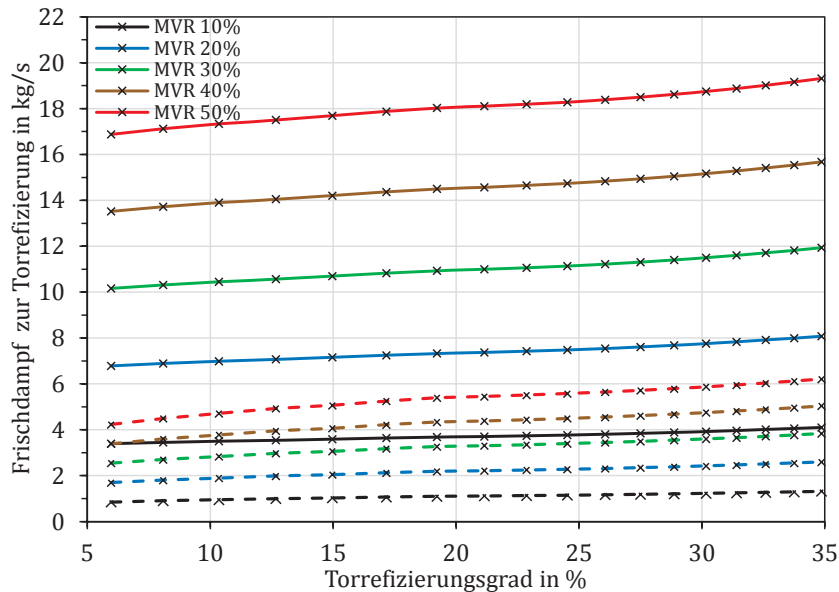


Abbildung 6.15: Frischdampfbedarf des Torrefizierungsreaktors bei den integrierten, dampfbeheizten Varianten mit zusätzlicher Vorwärmung (gestrichelte Linie) und ohne zusätzliche Vorwärmung (durchgezogene Linie) für verschiedene Mitverbrennungsraten und Torrefizierungsgrade

Somit kann mehr Dampf in der HD-Turbine Arbeit verrichten. Das bewirkt im Vergleich zur Variante ohne zusätzlichen Holzvorwärmer die Steigerung von Leistung und energetischer Effizienz des Gesamtprozesses. Der insgesamt zur Deckung des thermischen Energiebedarfs der Verfahrensschritte Holzvorwärmung und Torrefizierung notwendige Dampfmassenstrom ist durch zunehmende Reaktorgrößen und damit verbundene thermische Verluste geringfügig größer als bei der Variante ohne Vorwärmer. Die Leistungssteigerung durch die zusätzliche Verwendung eines Holzvorwärmers ist in Abbildung 6.16 dargestellt.

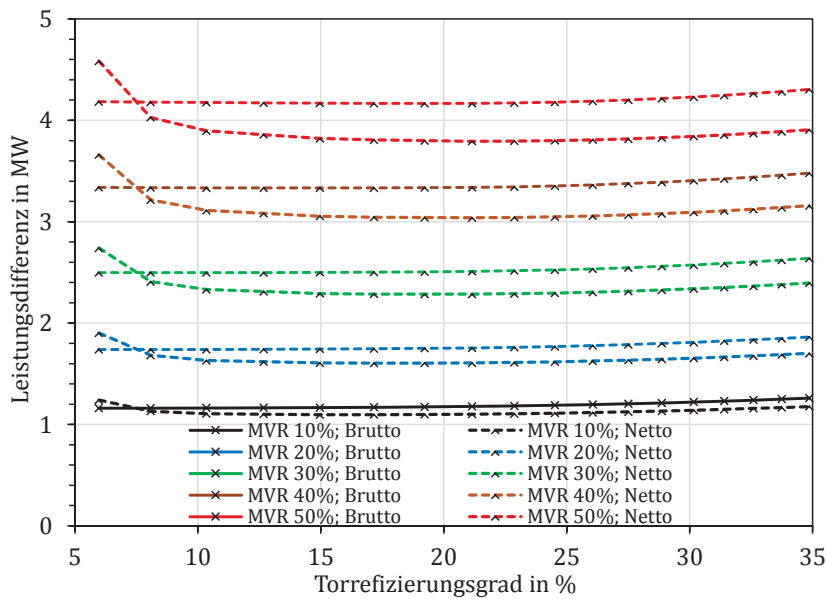


Abbildung 6.16: Leistungssteigerung der Kraftwerksanlage mit integrierter, dampfbeheizter Torrefizierung durch die Verwendung eines zusätzlichen Holzvorwärmers für verschiedene Mitverbrennungsraten und Torrefizierungsgrade

Mit zunehmender Mitverbrennungsrate ergeben sich höhere Leistungsvorteile für die Variante mit Holzvorwärmer. Für konstante Mitverbrennungsraten verhalten sich die Vorteile bei der Bruttoleistung bei zunehmendem Torrefizierungsgrad zunächst konstant und steigen bei hohen Torrefizierungsgraden geringfügig an. Bedingt durch kurze Verweilzeiten und entsprechend geringe thermische Verluste sowie vergleichbar geringe Torrefizierungsendtemperaturen sind die Vorteile bei der Nettoleistung bei geringen Torrefizierungsgraden am größten. Bei Torrefizierungsgraden zwischen 10 und 15% kommt es zu annähernd konstanten Werten, die bei höheren Torrefizierungsgraden über 25% geringfügig ansteigen.

Die entsprechenden Vorteile bei der energetischen Effizienz weisen ähnliche Verläufe auf wie die Vorteile bei den Leistungen. Sie sind in Abbildung 6.17 dargestellt. Insgesamt sind durch den zusätzlichen Vorwärmer bei typischen Torrefizierungsgraden zwischen 15 und 30% und einer Mitverbrennungsrate von 50% etwa um 0,2 %-Pkte. höhere Werte bei der energetischen Effizienz zu erreichen. Die mögliche Steigerung der Nettoleistung beträgt etwa 3,8 MW.

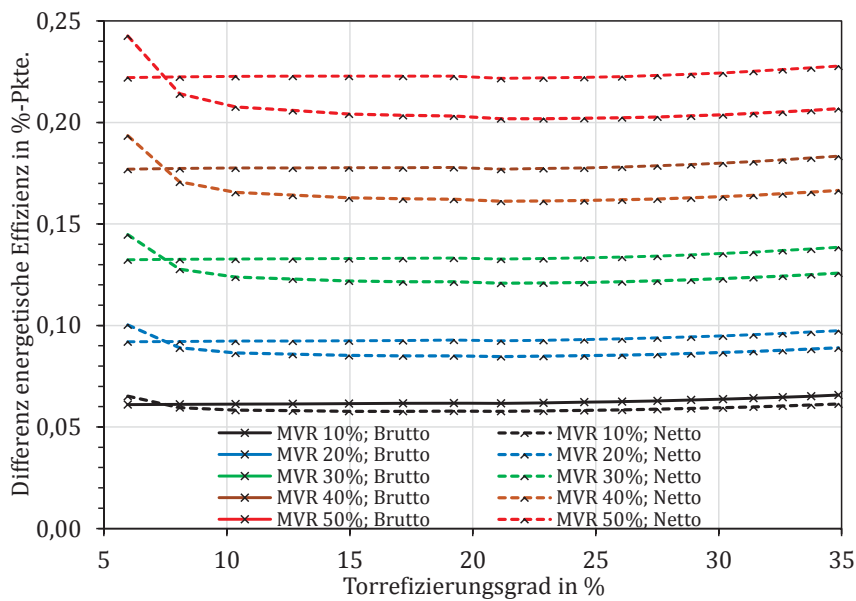


Abbildung 6.17: Steigerung der energetischen Effizienz der Kraftwerksanlage mit integrierter, dampfbeheizter Torrefizierung durch die Verwendung eines zusätzlichen Holzvorwärmers für verschiedene Mitverbrennungsraten und Torrefizierungsgrade

6.3.2 Rauchgasbeheizte Torrefizierung

Variante IntegRG_AWL

Die Ergebnisse der Gesamtprozesssimulation mit integrierter, rauchgasbeheizter Torrefizierung sind bezüglich der Brutto- und Nettoleistung in Abhängigkeit vom Torrefizierungsgrad für verschiedene Mitverbrennungsraten in Abbildung 6.18 dargestellt. Wie bei der dampfbeheizten Variante steigt die Bruttoleistung bei konstanter Mitverbrennungsraten mit zunehmendem Torrefizierungsgrad aufgrund abnehmender Abgasverluste leicht an. Die Kurven für die Nettoleistung bei konstanter Mitverbrennungsraten steigen mit zunehmendem Torrefizierungsgrad zunächst an und fallen bei höheren Torrefizierungsgraden wieder ab. Zum Anstieg kommt es auch in diesem Fall durch die Reduktion des Eigenbedarfs, die sich im Wesentlichen durch Vorteile bei der Mahlung der Biomasse ergibt, vgl. Abbildung 6.19. Höhere Torrefizierungsgrade führen unter den getroffenen Annahmen zu längeren Torrefizierungsreaktoren und damit bei der rauchgasbeheizten Variante zu einer Erhöhung der Druckverluste auf der Heizgasseite. Zusammen mit den in Abbildung 6.20 dargestellten, großen Heizgasmassenströmen ergibt sich daraus

eine hohe Leistungsaufnahme des zur Rückführung der Heizgase in den Kraftwerksprozess installierten Gebläses und dadurch ein deutlicher Anstieg des Eigenbedarfs bei höheren Torrefizierungsgraden.

Weitere Informationen zu den Wärmemengen, die dem Rauchgas entnommen werden, sowie zur Leistungsaufnahme des Gebläses sind in Anhang A.5 dargestellt.

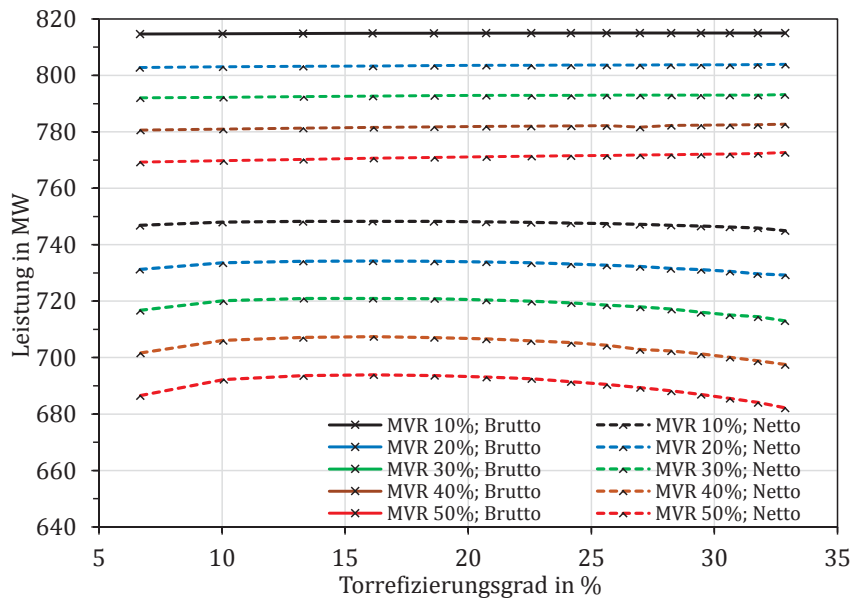


Abbildung 6.18: Netto- und Bruttoleistung der Kraftwerksanlage mit integrierter, rauchgasbeheizter Torrefizierung für verschiedene Mitverbrennungsraten und Torrefizierungsgrade – Variante IntegRG_AWL

Durch die geschilderten Effekte ergeben sich bei der Nettoleistung Maxima bei Torrefizierungsgraden um 15% und damit bei deutlich niedrigeren Werten als bei der dampfbeheizten Variante.

Die Ergebnisse bezüglich der energetischen Effizienz sind in Abbildung 6.21 dargestellt. Es kommt zu vergleichbaren Verläufen der Linien für die Brutto- und Nettoeffizienz wie bei der dampfbeheizten Variante. Durch die geschilderten Zusammenhänge ergeben sich die bei konstanter Mitverbrennungsraten auftretenden Maxima für niedrigere Torrefizierungsgrade als bei der dampfbeheizten Variante.

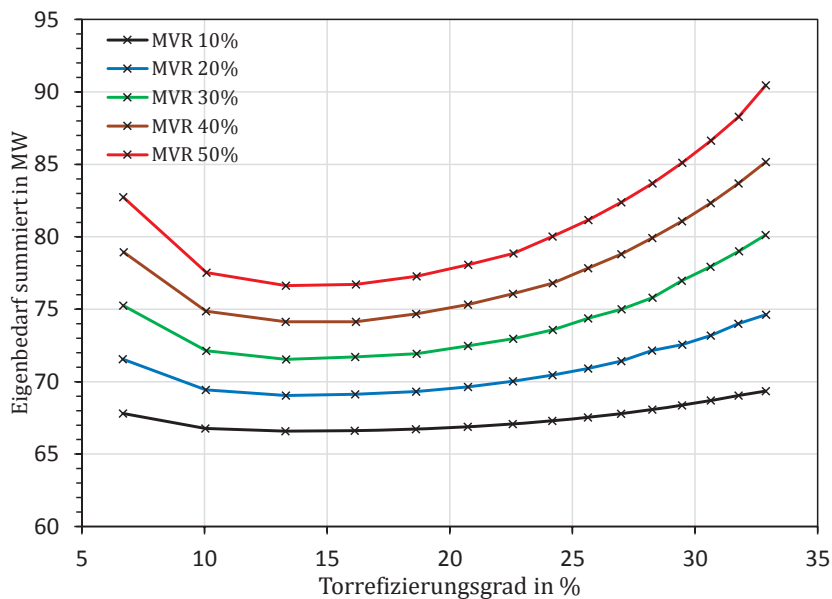


Abbildung 6.19: Eigenbedarf der Kraftwerksanlage mit integrierter, rauchgasbeheizter Torrefizierung für verschiedene Mitverbrennungsraten und Torrefizierungsgrade – Variante IntegRG_AWL

Die Maxima beim Nettowirkungsgrad liegen zwischen 15 und 20 % und damit bei vergleichbaren Werten wie die Maxima der Nettoleistung. Damit wird für die weiterführenden Betrachtungen für diese Variante ein optimaler Torrefizierungsgrad von 15% identifiziert. Die Kurzbezeichnung wird entsprechend ergänzt und lautet IntegRG_AWL15.

Die Ergebnisse bezüglich der spezifischen CO₂-Emissionen bei Variante IntegRG_AWL15 sind in Anhang A.5 dargestellt.

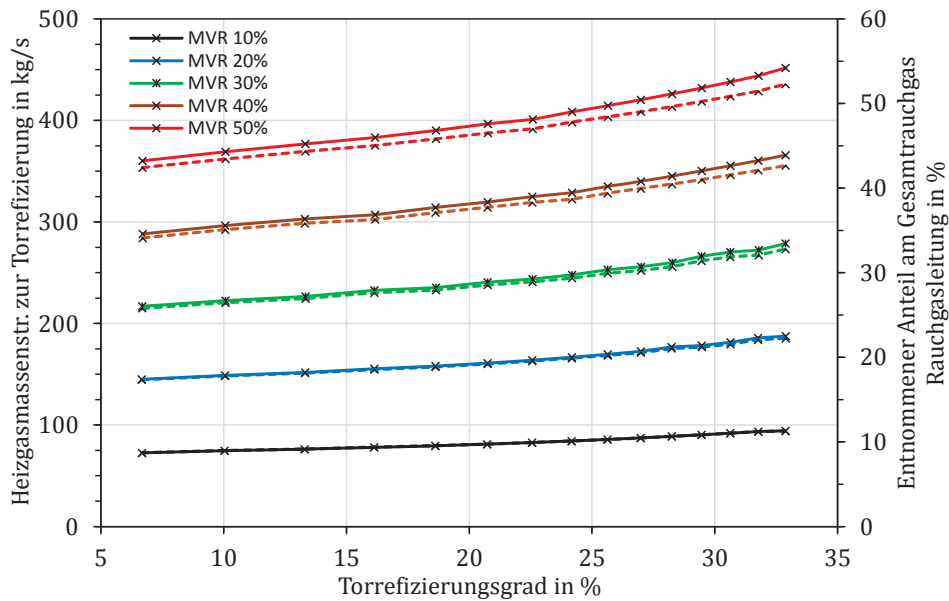


Abbildung 6.20: Absoluter Heizgasmassenstrom (durchgezogene Linie) und auf den gesamten Abgasmassenstrom des Kraftwerks bezogener Heizgasmassenstrom (gestrichelte Linie) zum Torrefizierungsreaktor für verschiedene Mitverbrennungsraten und Torrefizierungsgrade - Variante IntegRG_AWL

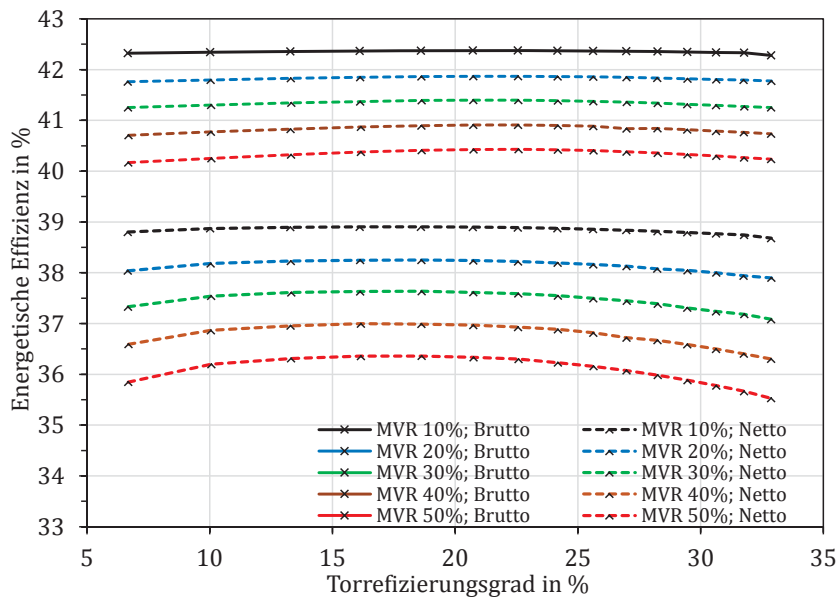


Abbildung 6.21: Energetische Effizienz der Kraftwerksanlage mit integrierter, rauchgasbeheizter Torrefizierung für verschiedene Mitverbrennungsraten und Torrefizierungsgrade - Variante IntegRG_AWL

6.3.3 Auswirkungen der einzelnen Prozessschritte

Die Auswirkungen der einzelnen Prozessschritte zur integrierten Biomassevorbehandlung und Mitverbrennung auf die Nettoleistung sowie die energetische Effizienz sind in Abbildung 6.22 und Abbildung 6.23 dargestellt. Die Darstellung erfolgt beispielhaft für die dampfbeheizten Varianten und einen Torrefizierungsgrad von 15 bzw. 30% in Abhängigkeit von der Mitverbrennungsrate.

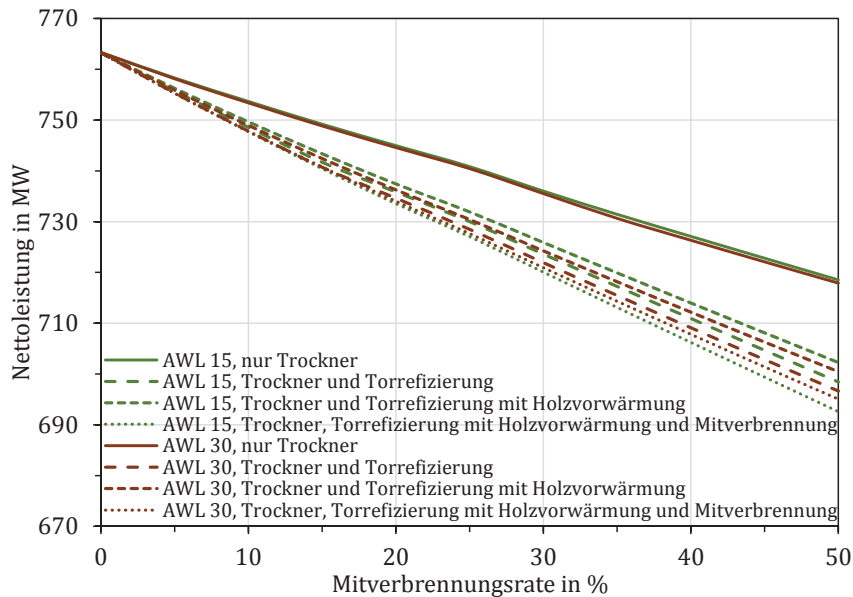


Abbildung 6.22: Einfluss der Prozessschritte Trocknung, Vorwärmung, Torrefizierung und Mitverbrennung auf die Nettoleistung für verschiedene Mitverbrennungsraten und Torrefizierungsgrade

Die Entnahme von Dampf aus der MD-/ND-Überströmleitung zur Trocknung der Biomasse trägt den größten Beitrag zur Absenkung von Leistung und energetischer Effizienz bei. Bei einer Mitverbrennungsrate von 50% sinkt die Nettoleistung alleine durch die Dampfentnahme zur Trocknung um etwa 45 MW und die Effizienz um etwa 2,3 %-Pkte. Für diese Mitverbrennungsrate ergibt sich durch die Dampfentnahme zur Beheizung der Torrefizierung je nach Torrefizierungsgrad eine Absenkung der Nettoleistung um etwa 20,1 bis 21,3 MW und eine Absenkung der Nettoeffizienz um etwa 0,9 bis 1,1 %-Pkte. Die zusätzliche Installation eines Holzvorwärmers reduziert die Absenkung der Nettoleistung um etwa 3,9 MW und die Absenkung der Nettoeffizienz um etwa 0,21 %-Pkte. Demnach kann die Absenkung von Nettoleistung und Nettowirkungsgrad aufgrund der Beheizung des

Torrefizierungsreaktors durch die Installation des zusätzlichen Holzvorwärmers um etwa 20% reduziert werden.

Die Mitverbrennung selbst führt zu einer weiteren Absenkung der Nettoleistung um etwa 5,4 bis 9,7 MW. Die energetische Effizienz verändert sich durch die Mitverbrennung von Holz mit einem Torrefizierungsgrad von 15% kaum. Die entsprechenden Kurven liegen im Diagramm übereinander. Bei der Verwendung von Holz mit einem Torrefizierungsgrad von 30% kommt es durch die Mitverbrennung zu einer Steigerung der energetischen Effizienz um etwa 0,6 %-Pkte.

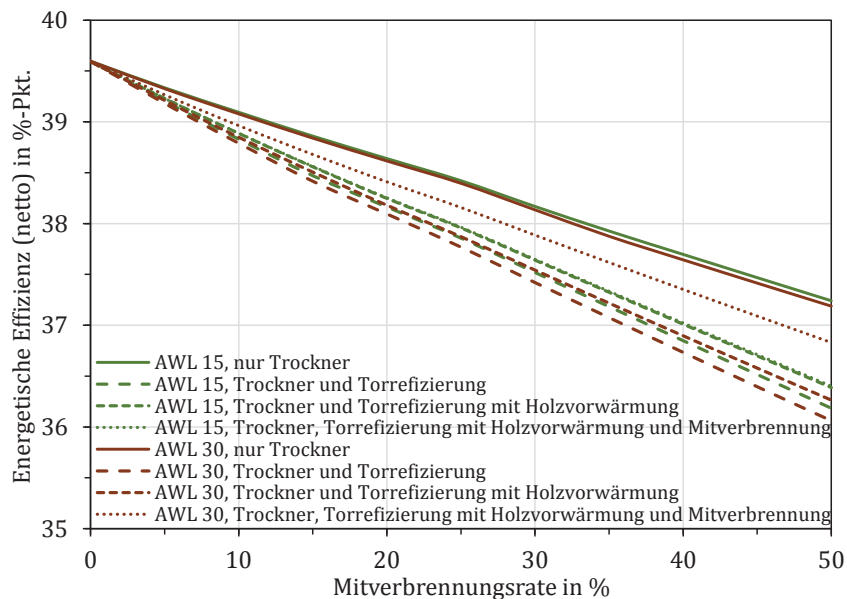


Abbildung 6.23: Einfluss der Prozessschritte Trocknung, Vorwärmung, Torrefizierung und Mitverbrennung auf die energetische Effizienz (netto) für verschiedene Mitverbrennungsraten und Torrefizierungsgrade

6.4 Energetische Effizienz

Die Ergebnisse zur energetischen Effizienz sind für alle betrachteten Varianten in Abbildung 6.24 dargestellt. Bei den integrierten Varianten werden die Ergebnisse mit den in Kapitel 6.3 identifizierten, optimierten Torrefizierungsgraden vorgestellt.

Beim Vergleich der Varianten mit integrierter Vorbehandlung liefert Variante IntegDampfVW_AWL30 für alle untersuchten Mitverbrennungsraten die höchsten energetischen Effizienzen. Die zweitbeste integrierte Variante stellt Variante

IntegDampf_AWL30 dar, gefolgt von Variante IntegRG_AWL15. Bei einer Mitverbrennungsrate von 50% kommt es für die genannten Varianten im Vergleich zum Kohlebetrieb zu einer Absenkung der energetischen Effizienz um etwa 2,8%-Pkte. (IntegDampfVW_AWL30), 3,0%-Pkte. (IntegDampf_AWL30) und 3,3%-Pkte. (IntegRG_AWL15).

Im Vergleich zum Kohlebetrieb ergibt sich bei den Importvarianten mit Torrefizierung (Import_AWL15 und Import_AWL30) bei einer Mitverbrennungsrate von 50% für beide Varianten eine vergleichbar große Absenkung der energetischen Effizienz von etwa 5,0 %-Pkte.

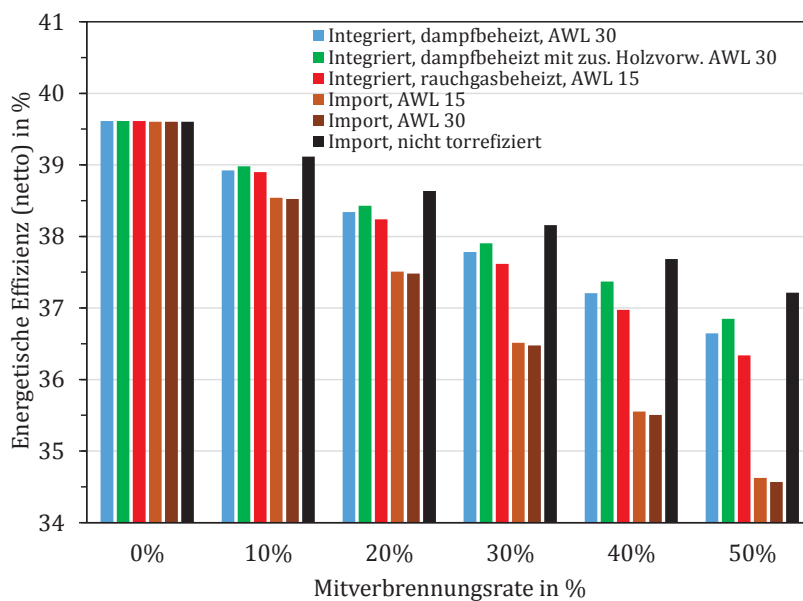


Abbildung 6.24: Energetische Effizienz aller betrachteten Varianten für verschiedene Mitverbrennungsraten

Insgesamt werden bei den untersuchten Varianten mit integrierter Vorbehandlung höhere energetische Effizienzen als bei den Importvarianten mit Torrefizierung erreicht. Die Nutzung prozessinterner Energie zur Vorbehandlung ist gegenüber der Vorbehandlung durch die Verbrennung zusätzlicher Biomasse deutlich im Vorteil. So führt die beste Variante mit integrierter Vorbehandlung bei einer Mitverbrennungsrate von 50% zu einer Absenkung der energetischen Effizienz im Vergleich zum Kohlebetrieb um etwa 2,8 %-Pkte., während die beste Importvariante mit Torrefizierung eine um etwa 5,0 %-Pkte geringere energetische Effizienz

aufweist. Die beste aller untersuchten Varianten mit torrefizierter Biomasse ist demnach bezüglich der energetischen Effizienz Variante IntegDampfVW_AWL30.

Die Importvariante ohne Torrefizierung (Import_AWL0) liefert höhere energetische Effizienzen als die Importvarianten mit Torrefizierung, weil der zusätzliche Aufwand zum Betrieb des Torrefizierungsreaktors entfällt. Im Vergleich zum Kohlebetrieb sinkt die energetische Effizienz bei dieser Variante und einer Mitverbrennungsrate von 50% um etwa 2,4 %-Pkte. Die beste integrierte Variante IntegDampfVW_AWL30 führt bei einer Mitverbrennungsrate von 50% lediglich zu einer um etwa 0,4 %-Pkte. niedrigeren energetischen Effizienz als Variante Import_AWL0, bei entsprechenden Vorteilen hinsichtlich Logistik und Lagerung.

6.5 CO₂-Bilanz

Im Folgenden werden zunächst die mit den untersuchten Brennstoffen durch Ernte bzw. Bereitstellung, Transport, Vorbehandlung und Verbrennung verbundenen, auf die enthaltene Brennstoffenergie bezogenen CO₂-Emissionen vorgestellt. Anschließend erfolgt die Vorstellung der Ergebnisse zu den spezifischen CO₂-Emissionen aller untersuchten Varianten.

6.5.1 CO₂-Bilanz der untersuchten Brennstoffe

CO₂-Emissionen für Bereitstellung/Ernte und Transport der Brennstoffe

Für die Ermittlung der mit Bereitstellung/Ernte und Transport der betrachteten Brennstoffe verbundenen CO₂-Emissionen werden die in Tabelle 5.10 definierten Transportmittel und Entfernungen zusammen mit den spezifischen Transportdaten aus Kapitel 5.7 ausgewertet. Die auf die Brennstoffenergie bezogenen, durch Bereitstellung und Transport auftretenden CO₂-Emissionen sind in Abbildung 6.25 dargestellt.

Trotz des weitesten Transportwegs aller betrachteter Brennstoffe ist die Steinkohle aufgrund der geringen Bereitstellungsemissionen, der hohen Energiedichte und der ausschließlichen Nutzung eines Seeschiffs zum Transport mit den geringsten auf die transportierte Energiemenge bezogenen spezifischen CO₂-Emissionen verbunden. Die nächst höheren spezifischen CO₂-Emissionen sind mit dem Transport lokaler Holzhackschnitzel verbunden. Trotz des sehr geringen Transportwegs kommt es aufgrund des Transportmittels LKW, wegen hoher Wassergehalte und hoher Emissionen bei der Bereitstellung zu höheren spezifischen CO₂-Emissionswerten als bei der Steinkohle.

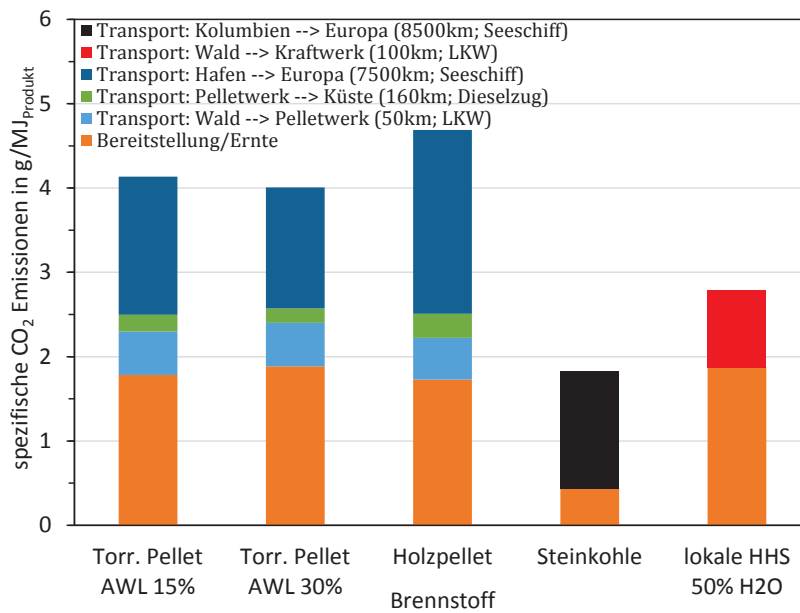


Abbildung 6.25: Spezifische CO₂-Emissionen durch Bereitstellung/Ernte und Transport für verschiedene Brennstoffe

Bei den Biomassen ergeben sich bereits durch die Bereitstellung spezifische CO₂-Emissionen in der gleichen Größenordnung wie bei der Steinkohle durch Bereitstellung und Transport zusammen. Dazu kommen bei den drei aus Nordamerika importierten Biomassen die mit dem Transport in Nordamerika und dem Schiffstransport nach Europa verbundenen spezifischen CO₂-Emissionen. Beim Schiffstransport ist anzumerken, dass die Torrefizierung mit AWL30% die durch diesen bedingten Emissionen auf das Niveau der spezifischen CO₂-Emissionen beim Schiffstransport von Steinkohle reduzieren kann. Im Vergleich der drei importierten Holzbrennstoffe kommt es deshalb bei den intensiv torrefizierten Holzpellets zu den geringsten spezifischen CO₂-Emissionen durch Bereitstellung und Transport. Für nicht torrefizierte Holzpellets ergeben sich die höchsten spezifischen CO₂-Emissionen.

CO₂-Emissionen für Bereitstellung, Transport, Vorbehandlung und Verbrennung

Der thermische Bedarf zur Trocknung und Torrefizierung wird bei den Einzelanlagen vollständig durch die Verbrennung von Biomasse bereitgestellt und ist dadurch als CO₂-neutral zu bewerten. Dennoch kommt es durch den Einsatz elektrischer Energie zum Betrieb der Reaktoren und aller notwendigen

Zusatzsysteme wie Gebläse, Pumpen und dergleichen zu indirekten CO₂-Emissionen. Berücksichtigt man diese mit der Vorbehandlung verbundenen Emissionen anhand eines für die USA typischen Emissionsfaktors aus Tabelle 5.7, so ergeben sich zusammen mit den bereits in Abbildung 6.25 dargestellten Emissionen durch Bereitstellung und Transport die in Abbildung 6.26 dargestellten Ergebnisse.

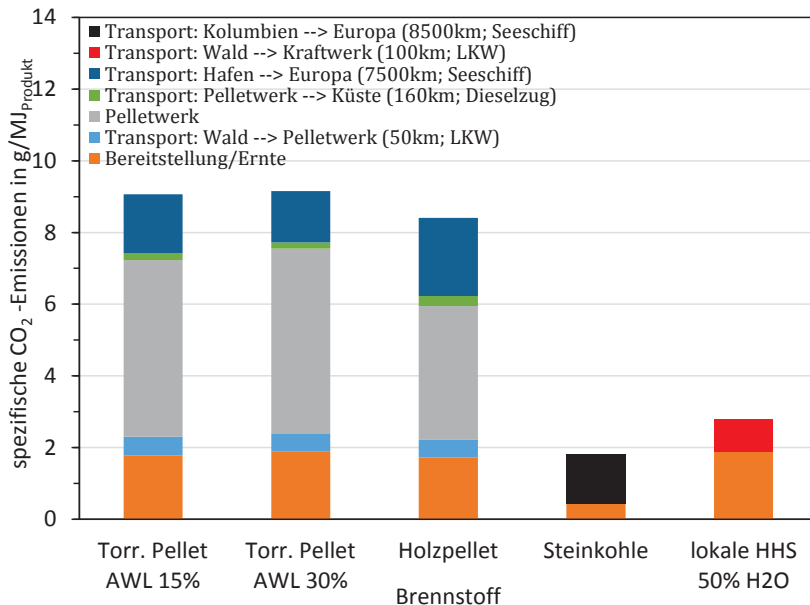


Abbildung 6.26: Spezifische CO₂-Emissionen durch Bereitstellung/Ernte, Pelletproduktion und Transport für verschiedene Brennstoffe

Bei den drei importierten Biomassen erhöhen sich die Emissionen durch die Berücksichtigung der Vorbehandlung. Die Erhöhung fällt bei den torrefizierten Holzpellets durch den zusätzlich zur Trocknung anfallenden Bedarf der Torrefizierung höher aus als bei den Holzpellets. Dadurch ergeben sich für die torrefizierten Holzpellets mit etwa 9 g/MJ_{Produkt} die höchsten spezifischen CO₂-Emissionen. Im Vergleich zur Steinkohle bzw. den lokalen Holz hackschnitzeln entspricht das bei den torrefizierten Holzpellets einer Erhöhung um einen Faktor von etwa 4,9 bzw. 3,2.

Der entscheidende Vorteil aller betrachteten Biobrennstoffe ergibt sich durch die zusätzliche Betrachtung der CO₂-Emissionen aus der Verbrennung. Die Emissionen aus der Verbrennung werden bei den Biomassen als CO₂-neutral angenommen; der Steinkohle als fossilem Brennstoff werden hingegen durch die Verbrennung verursachte CO₂-Emissionen zugeordnet. Die entsprechenden Ergebnisse sind in Abbildung 6.27 zusammen mit den bereits in Abbildung 6.26 gezeigten Ergebnissen dargestellt. Dabei wird deutlich, dass die Emissionen aus Bereitstellung, Transport

und Vorbehandlung der Biobrennstoffe im Vergleich zu den Gesamtemissionen der Steinkohle als gering zu bewerten sind. Durch den Einsatz von Steinkohle kommt es im Vergleich zu den torrefizierten Holzpellets zu einer Erhöhung der Emissionen um den Faktor 10,7.

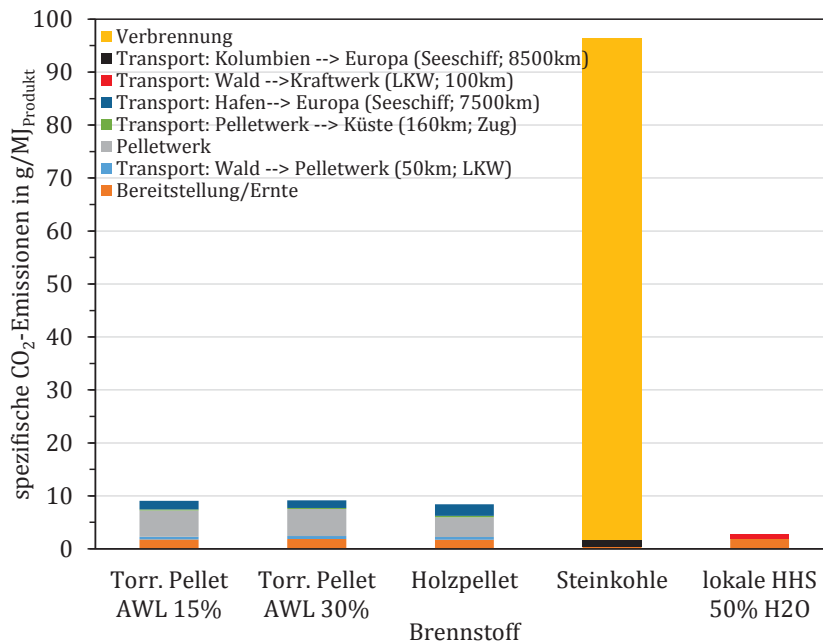


Abbildung 6.27: Spezifische CO₂-Emissionen durch Bereitstellung/Ernte, Pelletproduktion, Transport und Verbrennung verschiedener Brennstoff

6.5.2 CO₂-Bilanz der untersuchten Varianten

In Abbildung 6.28 sind die auf eine kWh_{el} bezogenen, spezifischen Gesamt-CO₂-Emissionen dargestellt, bestehend aus den Einzelemissionen infolge Bereitstellung/Ernte, Transport, Vorbehandlung und Verbrennung für alle untersuchten Varianten. Bei den Importvarianten sind durch die Verwendung zusätzlicher thermischer Energie in Form von Biomasse zur Beheizung der Vorbehandlung niedrigere CO₂-Emissionen zu erwarten als bei den integrierten Varianten, wo die Entnahme thermischer Energie aus dem Prozess zu einer Absenkung der Nettoleistung führt. Dieser „Vorteil“ der Importvarianten bezüglich der CO₂-Emissionen wird jedoch dadurch erkauft, dass sich der Bedarf an Rohbiomasse erhöht. Im Gegensatz dazu bewirken die deutlich längeren Transportwege bei den Importvarianten eine Erhöhung der CO₂-Emissionen. Beide Effekte gleichen sich in etwa aus und führen zu den in Abbildung 6.28 dargestellten

Ergebnissen. Zwischen allen untersuchten Varianten ergeben sich bei konstanter Mitverbrennungsrate nur sehr kleine Unterschiede von maximal 13 g/kWh_{el}.

Es wird deutlich, dass durch die Mitverbrennung von Biomasse eine erhebliche Reduktion der CO₂-Emissionen pro erzeugter kWh_{el} erreicht werden kann. Durch eine Mitverbrennungsrate von 50% können die spezifischen Gesamtemissionen von etwa 831 g/kWh_{el} im Kohlebetrieb auf 453 – 461 g/kWh_{el} und damit um etwa 45% gesenkt werden.

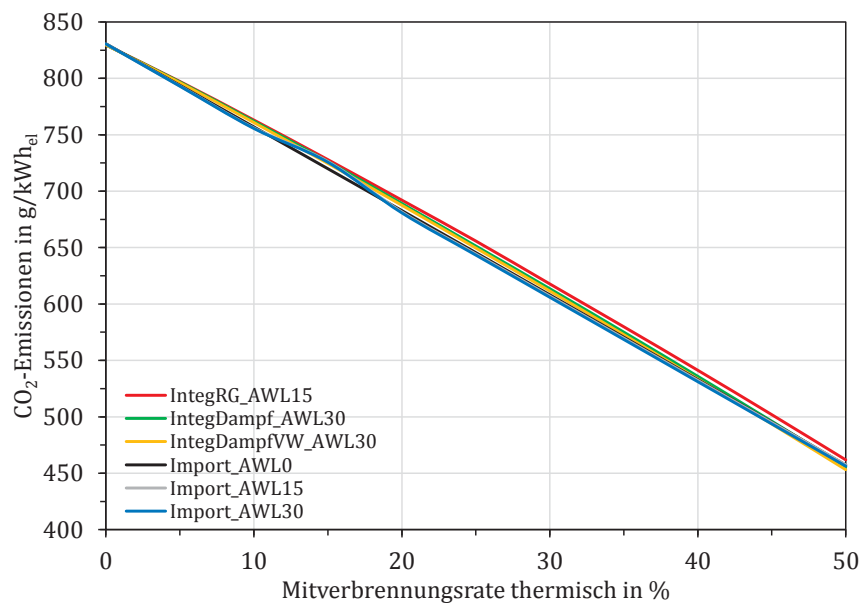


Abbildung 6.28: CO₂-Emissionen durch Kraftwerk und Brennstoffversorgung bei allen betrachteten Szenarien mit jeweils optimalem Torrefizierungsgrad für verschiedene Mitverbrennungsraten

6.6 Abschließende Bewertung

Abschließend erfolgt eine Bewertung der untersuchten Varianten zur Mitverbrennung von Biomasse unter Berücksichtigung der im Rahmen dieser Arbeit diskutierten Vor- und Nachteile, des technischen Aufwands zur Nachrüstung bzw. zum Bau der jeweiligen Anlagen sowie der ermittelten Ergebnisse bezüglich der energetischen Effizienz. In allen Fällen wird die ausreichende Verfügbarkeit von Biomasse vorausgesetzt, wirtschaftliche Gründe spielen keine Rolle. Die Ausführungen beziehen sich zunächst auf alle Varianten mit Torrefizierung, im

letzten Absatz erfolgt eine Einordnung der Ergebnisse im Vergleich zur Importvariante ohne Torrefizierung.

Beim Vergleich der integrierten Varianten mit Torrefizierung liefern die dampfbeheizten Varianten die besten Ergebnisse hinsichtlich der energetischen Effizienz. Dabei liegt die dampfbeheizte Variante mit zusätzlicher Vorwärmung (IntegDampfVW_AWL30) knapp vor der dampfbeheizten Variante ohne Vorwärmung (IntegDampf_AWL30). Die rauchgasbeheizte Variante (IntegRG_AWL15) schneidet im Vergleich schlechter ab. Auch der technische Aufwand zur Nachrüstung ist bei der rauchgasbeheizten Variante größer. Durch die Nutzung sensibler Rauchgaswärme und die prozessbedingte Begrenzung der Rauchgastemperaturen werden sehr große Rauchgasmassenströme notwendig. Bei einer Mitverbrennungsrate von 50% müssen bis zu 50% des Rauchgasmassenstroms nach dem Kessel zur Beheizung der Torrefizierung entnommen werden. Bei den dampfbeheizten Varianten sind die erforderlichen Heizedampfmassenströme deutlich kleiner: Ohne zusätzliche Vorwärmung werden bei einer Mitverbrennungsrate von 50% etwa 2,5 % des Frischdampfmassenstroms zur Beheizung der Torrefizierung verwendet. Bei der Variante mit zusätzlicher Holzvorwärmung sind es etwa 1 % des Frischdampfmassenstroms und zusätzlich etwa 2,2 % des Massenstroms der kalten Zwischenüberhitzung. Zudem kann bei der kalten Zwischenüberhitzung auf eine bereits bestehende Entnahmestelle zurückgegriffen werden. Insgesamt ist damit Variante IntegDampfVW_AWL30 als die beste der untersuchten Varianten zur integrierten Vorbehandlung zu bewerten.

Beim Vergleich der untersuchten Importvarianten mit Torrefizierung kommt es nur zu geringen Unterschieden bei den energetischen Effizienzen. Die Variante mit einem Torrefizierungsgrad von 15 % liefert geringfügig bessere Ergebnisse. Auch der technische Aufwand bei der Umsetzung einer solchen Einzelanlage ist bei niedrigeren Torrefizierungsgraden geringer, weil der erforderliche Torrefizierungsreaktor aufgrund verkürzter Verweilzeiten kleiner ausgeführt werden kann. Insgesamt liefert ein Torrefizierungsgrad von 15 % bei der Vorbehandlung in Einzelanlagen unabhängig vom Kraftwerk die besten Ergebnisse. Variante Import_AWL15 ist damit als beste der untersuchten Importvarianten zu bewerten.

Beim Vergleich der integrierten Varianten mit den Importvarianten mit Torrefizierung ergeben sich hinsichtlich der energetischen Effizienzen klare Vorteile bei den integrierten Varianten. Die Nutzung prozessinterner Wärme zur Beheizung der Vorbehandlungsreaktoren ist gegenüber der Verbrennung zusätzlicher Biomasse zur Wärmeerzeugung vorteilhaft. Dadurch ergibt sich im Vergleich der jeweils besten Varianten bei einer Mitverbrennungsrate von 50 % eine um etwa 2,6 %-Pkte. höhere energetische Effizienz bei der integrierten Variante. Die Absenkung der energetischen Effizienz durch die Mitverbrennung von Biomasse ist bei der integrierten Variante nur etwa halb so groß wie bei der Importvariante. Allerdings sind mit den integrierten Varianten auch Nachteile verbunden: Weil Prozessdampf genutzt wird, sinkt die Anlagenleistung und der Anlagenwirkungsgrad des Kraftwerks. Am Kraftwerk werden Umrüstarbeiten notwendig und es wird mehr Platz benötigt. Zudem ist der Betrieb der Vorbehandlungseinrichtungen vom Betrieb des Kraftwerks abhängig. Insgesamt können aufgrund der deutlich besseren energetischen Effizienzen dennoch Vorteile bei den Varianten mit integrierter Vorbehandlung identifiziert werden. Somit ist Variante IntegDampfVW_AWL30 als beste aller untersuchten Varianten mit Torrefizierung zu bewerten.

Die von einem Kraftwerksprozess unabhängige Erzeugung von nicht torrefizierten Holzpellets in einer Einzelanlage spiegelt die heute in vielen Fällen angewandte Praxis der großtechnischen Mitverbrennung von Biomasse wieder. Durch den Verzicht auf die Torrefizierung kommt es zu deutlich geringeren Einbußen bei der energetischen Effizienz als bei den Importvarianten mit Torrefizierung. Dennoch muss auch bei dieser Variante zusätzliche Biomasse zur Wärmeerzeugung für den Trocknungsprozess verbrannt werden. Insgesamt können dadurch energetische Effizienzen erreicht werden, die besser sind als bei den integrierten Varianten. Hinsichtlich der energetischen Effizienz unterscheiden sich die beiden Varianten IntegDampfVW_AWL30 und Import_AWL0 um etwa 0,4 %-Pkte. Zudem bleiben die genannten Nachteile bei Transport und Lagerung von nicht torrefizierter Biomasse erhalten. Insgesamt lassen sich deshalb Vorteile bei der Variante mit integrierter, dampfbeheizter Vorbehandlung mit zusätzlicher Vorwärmung identifizieren. Variante IntegDampfVW_AWL30 ist damit als beste aller in dieser Arbeit untersuchten Varianten zu bewerten.



7 ZUSAMMENFASSUNG

Nationale und europäische Ziele zur Reduktion der CO₂-Emissionen haben zu einer Zunahme der Produktion von Elektrizität aus erneuerbaren Energien geführt. Die Erzeugung von Strom aus Wind und Sonne fluktuiert, weil sie abhängig von Wetter und Tageszeit ist. Dadurch sind zur Aufrechterhaltung der Versorgungssicherheit vor allem bei größeren Anteilen erneuerbarer Energien regelbare Erzeugungskapazitäten notwendig. Neben der Wasserkraft können vor allem durch die Nutzung von Biomasse wesentliche Anteile an regelbarem und erneuerbarem Strom produziert werden. Die Mitverbrennung von Biomasse in Kohlekraftwerken bietet durch die Nutzung bereits bestehender Kraftwerkskapazitäten mit hohen Wirkungsgraden Vorteile gegenüber der Nutzung von Biomasse in kleinen, ausschließlich mit Biomasse befeuerten Kraftwerken.

Durch verschiedene Eigenschaften holzartiger Biomassen wie hohe Wassergehalte, geringe Energiedichten und faserige Strukturen kommt es bei der Nutzung von Biomasse in Kohlekraftwerken im Vergleich zum Betrieb mit Steinkohle zu Nachteilen. Die thermische Vorbehandlung holzartiger Biomasse kann diese Nachteile weitgehend ausgleichen und ermöglicht die Erzeugung eines hochwertigen, biogenen Festbrennstoffs mit deutlich verbesserten Eigenschaften.

Die Vorbehandlung holzartiger Biomasse zur Mitverbrennung in Kohlekraftwerken kann am Kraftwerksstandort unter Nutzung vorhandener Prozesswärmeströme durchgeführt werden. Als Alternative bieten sich die Vorbehandlung am Ort des Biomasseanfalls und der anschließende Transport zum Kraftwerk an. Beide Möglichkeiten werden durch die Simulation von Kraftwerks- und Vorbehandlungsprozessen in verschiedenen Varianten untersucht.

Bei der Vorbehandlung am Kraftwerksstandort kommen lokal verfügbare Holzhackschnitzel zum Einsatz. Zur Reduktion der hohen Wassergehalte in einem Trockner bietet sich die Nutzung von Dampf aus der MD/ND-Überströmleitung an; diese Möglichkeit kommt in allen untersuchten Varianten mit integrierter Vorbehandlung zum Einsatz. Unterschiede bei den untersuchten Varianten ergeben sich bei der Beheizung des Torrefizierungsprozesses. Durch das bei der Torrefizierung erforderliche Temperaturniveau von etwa 300 °C besteht die Möglichkeit zur indirekten Beheizung mit Dampf aus dem Kraftwerksprozess nur durch die Verwendung von Frischdampf. In einer zweiten Variante wird das Holz ebenfalls durch die indirekte Beheizung mit Frischdampf torrefiziert. Vor der

eigentlichen Torrefizierung findet zusätzlich eine Vorwärmung der Biomasse auf etwa 200 °C statt. Die Beheizung dieses Vorwärmers erfolgt mit Dampf aus der kalten Zwischenüberhitzung. Alternativ zur Nutzung von Dampf ist auch die Beheizung des Torrefizierungsreaktors mit heißen Rauchgasen aus dem Kraftwerksprozess denkbar. Sie wird als weitere Variante untersucht. Dazu werden Rauchgase nach dem Austritt aus dem Dampferzeuger aus dem Kraftwerksprozess entnommen und zur Beheizung des Reaktors eingesetzt.

Bei der Vorbehandlung von Biomasse am Ort des Biomasseanfalls bzw. in Ländern mit hohen Biomassepotentialen entfällt die Möglichkeit Wärme aus einem Kraftwerksprozess zu nutzen. Die zur Vorbehandlung benötigte thermische Energie wird in diesem Fall durch die Verbrennung von Biomasse bereitgestellt. Entsprechende Anlagen zur Erzeugung von torrefizierten sowie von nicht torrefizierten Holzpellets werden modelliert und ausgewertet. In Anlehnung an zunehmende Importe von Holzpellets aus Nordamerika werden verschiedene Varianten mit Ernte und Vorbehandlung von Holz in Nordamerika und anschließender Verschiffung nach Europa betrachtet.

Zusätzlich zur Untersuchung der Vorbehandlungsprozesse berücksichtigt die vorliegende Arbeit die CO₂-Emissionen durch Bereitstellung bzw. Ernte und Transport der jeweiligen Biomassen und der verwendeten Steinkohle. Die entsprechenden Werte werden auf Basis von Transportbilanzen und Literaturdaten für alle betrachteten Varianten ermittelt.

Bei der integrierten Vorbehandlung werden für alle untersuchten Varianten optimale Torrefizierungsgrade mit maximalen Werten für energetische Effizienz und Leistung der Kraftwerksanlage identifiziert. Die rauchgasbeheizte Torrefizierung wird demnach am besten bei Torrefizierungsgraden um 15% betrieben, die beiden dampfbeheizten Varianten der Torrefizierung bei Torrefizierungsgraden um 30%. Die höchsten energetischen Effizienzen und Nettoleistungen des Gesamtprozesses ergeben sich bei der Variante mit dampfbeheizter Torrefizierung mit zusätzlichem Holzvorwärmer. Im Vergleich zum Kohlebetrieb ergibt sich bei dieser Variante und einer Mitverbrennungsrate von 50% eine Absenkung der energetischen Effizienz um 2,8 %-Pkte.

Bei den Importvarianten mit Torrefizierung kommt es im Vergleich zum Kohlebetrieb bei einer Mitverbrennungsrate von 50% zu einer Absenkung der energetischen Effizienz um etwa 5,0 %-Pkte. und damit zu deutlich schlechteren

Ergebnissen als bei den integrierten Varianten. Die Importvariante ohne Torrefizierung führt zu einer Absenkung der energetischen Effizienz um etwa 2,4 %-Pkte.

Beim Vergleich der integrierten Varianten mit der Vorbehandlung in Nordamerika und dem anschließenden Import der vorbehandelten Biomasse ergeben sich nur geringfügige Unterschiede bezüglich der spezifischen CO₂-Emissionen. Die Vorteile durch die Verwendung lokaler Biomassen beim Transport gleichen sich mit den Nachteilen durch eine Leistungsabsenkung bei der integrierten Vorbehandlung in etwa aus. Bezüglich der erreichbaren energetischen Effizienzen sind die Varianten mit integrierter Vorbehandlung gegenüber den Importvarianten mit Torrefizierung im Vorteil. Die höchsten Effizienzen aller Varianten mit Torrefizierung bietet die Variante mit integrierter, dampfbeheizter Torrefizierung mit zusätzlicher Holzvorwärmung. Im Vergleich zur Importvariante ohne Torrefizierung bedeutet das bei einer Mitverbrennungsrate von 50% eine um nur etwa 0,4 %-Pkte. niedrigere Gesamteffizienz. Die Integration der Vorbehandlung in den Kraftwerksprozess kann die Nachteile der Torrefizierung bezüglich der energetischen Effizienz demnach weitgehend kompensieren.

Ernte bzw. Bereitstellung, Vorbehandlung und Transport spielen für die Gesamtwerte der CO₂-Emissionen im Vergleich zur Verbrennung der Steinkohle im Kraftwerk nur eine kleine Rolle. Die Mitverbrennung von Biomasse führt bei allen untersuchten Varianten und einer Mitverbrennungsrate von 50% zu einer Reduktion der CO₂-Emissionen pro erzeugter kWh_{el} von etwa 45%.

Die dargestellten Ergebnisse zeigen, dass sich durch die Mitverbrennung von torrefizierter Biomasse die spezifischen CO₂-Emissionen von kohlebefeuerten Kraftwerksanlagen senken lassen. Dabei führt die Nutzung von intern torrefizierten Biomassen im Vergleich zu nicht torrefizierten Biomassen zu einer Verbesserung der energetischen Effizienzen; die mit dem Einsatz nicht torrefizierter Biomasse verbundenen Nachteile werden weitestgehend aufgehoben. Die Nutzung extern torrefizierter Biomassen führt im Vergleich dazu zu schlechten energetischen Effizienzen. Durch die Integration der Vorbehandlung mit Torrefizierung in einen Kraftwerksprozess können energetische Effizienzen erreicht werden, die ähnlich sind wie bei der externen Vorbehandlung ohne Torrefizierung. Insgesamt ergeben sich bei Beachtung aller betrachteten Ergebnisse Vorteile bei der integrierten dampfbeheizten Torrefizierung mit zusätzlicher Holzvorwärmung.





LITERATURVERZEICHNIS

- [1] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE (Hrsg.): *Zahlen und Fakten Energiedaten - Nationale und Internationale Entwicklung*. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, März 2015
- [2] PACHAURI, R.K (Hrsg.) ; MEYER, L. et a. (Hrsg.). IPCC: Climate Change 2014: Synthesis Report / IPCC. 2014. – Forschungsbericht
- [3] UNITED NATIONS: *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change*. <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>. Version: September 2015
- [4] SOLOMON, S.; QIN, M.; MANNING, Z.; MARQUIS, K. B.; AVERYT, M; TIGNOR, M; MILLER, H. L.: *IPCC, 2007: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: The Physical Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA
- [5] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY: *World Energy Outlook 2014*. – Forschungsbericht
- [6] BUNDESMINISTERIUM FÜR JUSTIZ UND FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ: *Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien - EEG2014*. http://www.gesetze-im-internet.de/-bundesrecht/eeg_2014/gesamt.pdf. Version: September 2015
- [7] RODE, H.: *Entwicklungslinien der Braunkohlekraftwerkstechnik*, Universität Duisburg-Essen, Essen, Diss., 2004
- [8] CHEN, W.-H. ; PENG, J. ; BI, X. T.: A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 44 (2015), S. 845 – 866
- [9] ESELTINE, D. ; THANAPAL, S. S. ; ANNAMALAI, K. ; RANJAN, D.: Torrefaction of woody biomass (Juniper and Mesquite) using inert and non-inert gases. In: *Fuel* 113 (2013), S. 379 – 388
- [10] ROUSSET, P. ; MACEDO, L. ; COMMADRÉ, J.-M. ; MOREIRA, A.: Biomass torrefaction under different oxygen concentrations and its effect on the composition of the solid by-product. In: *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 96 (2012), S. 86 – 91

-
- [11] NAM, H. ; CAPAREDA, S.: Experimental investigation of torrefaction of two agricultural wastes of different composition using RSM (response surface methodology). In: *Energy* 91 (2015), S. 507 – 516
- [12] KEIPI, T ; TOLVANEN, H ; KOKKO, L. ; RAIKO, R.: The effect of torrefaction on the chlorine content and heating value of eight woody biomass samples. In: *Biomass and Bioenergy* 66 (2014), S. 232 – 239
- [13] ANTOLINI, D. ; GRIGRIANTE, M. ; BRIGHENTI, M.: Hydrophobicity behaviour and fibres distribution of two different woody biomass torrefied at different conditions / University of Trento, Italien. 2015. – Forschungsbericht
- [14] GIL, M.V. ; GARCÍA, R. ; PEVIDA, C. ; RUBIERA, F.: Grindability and combustion behaviour of coal and torrefied biomass blends. In: *Bioresource Technology* 191 (2015), S. 205 – 212
- [15] PEDUZZI, E. ; BOISSONNET, G. ; HAARLEMMER, G. ; DUPONT, C. ; MARÉCHAL, F.: Torrefaction modelling for lignocellulosic biomass conversion processes. In: *Energy* 70 (2014), S. 58 – 67
- [16] JOSHI, Y. ; DE VRIES, H. ; WOUDESTRA, T. ; DE JONG, W.: Torrefaction: Unit operation modelling and process simulation. In: *Applied Thermal Engineering* 74 (2015), S. 83 – 88
- [17] RATTE, J. ; FARDET, D. ; MATEOS, J.-S.: Mathematical modelling of a continuous biomass torrefaction reactor: TORSPYD column. In: *Biomass and Bioenergy* 35 (2011), S. 3481 – 3495
- [18] SERMYAGINA, E. ; SAARI, J. ; ZAKERI, B. ; KAIKKO, J. ; VAKKILAINEN, E.: Effect of heat integration method and torrefaction temperature on the performance of an integrated CHP-torrefaction plant. In: *Applied Energy* 149 (2015), S. 24 – 34
- [19] RÖDER, H.: Biomass Imports to Europe and Global Availability. In: *IEA CCC - 2nd Biomass Cofiring Workshop*. Kopenhagen, Dänemark, März 2012
- [20] KOPPEJAN, J.: *Database of Biomass Cofiring initiatives*. Online. <http://www.ieabcc.nl/database/cofiring.html>. Version: Oktober 2015
- [21] AGBOR, E. ; ZHANG, X. ; KUMAR, A.: A review of biomass co-firing in North America. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 40 (2014), S. 930 – 943

-
- [22] FERNANDO, R.: Cofiring high ratios of biomass with coal / IEA Clean Coal Center. 2012. – Forschungsbericht
- [23] CREMERS: Technical status of biomass co-firing / IEA Bioenergy Task 32. 2009. – Forschungsbericht
- [24] INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (Hrsg.): *Biomass Cofiring - Technology Brief*. International Renewable Energy Agency, Januar 2013
- [25] FERNANDO, R.: Fuels for biomass cofiring / IEA Clean Coal Center. 2005. – Forschungsbericht
- [26] ZULFIQUAR, M. H. ; MOGHTADERI, B. ; WALL, T. F.: Co-Milling of Coal and Biomass in a Pilot-Scale vertical Spindle Mill / Cooperative Research Centre for Coal in Sustainable Development (Australien). 2006. – Forschungsbericht
- [27] DISTLER, T ; EVERTS, B.: Modellierung der Integration eines Trocknungs- und Torrefizierungsprozesses in ein kohlestaubbefeuertes Kraftwerk zur Reduzierung des Mahlaufwands bei der Mitverbrennung von Biomasse. In: *EUBC&E, Hamburg*. 2014
- [28] TOSNEY, S.: Drax Biomass Transformation. In: *IEA CCC - 5th workshop on cofiring biomass with coal*. Drax, Vereinigtes Königreich, September 2015
- [29] WILLEBOER, W.: Status and future of Essent's biomass activities. In: *IEA CCC - 2nd workshop on cofiring biomass with coal*. Kopenhagen, Dänemark, März 2012
- [30] SOERENSEN, H. D.: Avedore unit 2 - the world's largest biomass-fuelled CHP plant. In: *IEA CCC - 1st workshop on cofiring biomass with coal*. Drax, Vereinigtes Königreich, Januar 2011
- [31] LIVINGSTON, B.: Recent developments in biomass cofiring in large coal-fired utility boilers. In: *IEA CCC - 2nd Biomass Cofiring Workshop*. Kopenhagen, Dänemark, März 2012
- [32] MESSERSCHMIDT, P.: Application of CFA when firing wood pellets. In: *IEA CCC - 5th workshop on cofiring biomass with coal*. Drax, Vereinigtes Königreich, September 2015
- [33] FLEMMING, J. F.: *Ash formation, deposition and corrosion when utilising straw for heat and power production*. 2011 (DTU Department of Chemical and Biochemical Engineering)

-
- [34] VATTENFALL: *ChlorOut- Combating deposit formation and emissions in biomass and waste fired boilers*. Online. <http://chlorout.vattenfall.com/en/the-chlorout-additive.htm>. Version: Oktober 2015
- [35] VAN EIJK, R. ; STAM, A.: Co-firing and ash quality. In: *IEA CCC - 2nd workshop on cofiring biomass with coal*. Kopenhagen, Dänemark, März 2012
- [36] DRAX POWER LTD.: *Persönliche Information im Rahmen einer Kraftwerksführung am Standort Drax*. September 2015
- [37] KLEINSCHMIDT, C. P.: Statusoverzicht en impactanalyse van torrefactir in Nederland / KEMA. 2010. – Forschungsbericht
- [38] MIDDELKAMP, J.: Biomass co-firing and full repowering - recent developments and KEMA's expectations. In: *IEA CCC - 2nd Biomass Cofiring Workshop*. Kopenhagen, Dänemark, März 2012
- [39] CREMERS, M. ; WITKAMP, J. ; MIDDELKAMP, J. ; BEEKES, M. ; JANS, G.: Assessment of the status and prospects of upgraded biomass for large scale utilization in pulverized coal fired boilers. In: *IEA CCC - 3rd workshop on cofiring biomass with coal*. Groningen, Niederlande, Juni 2013
- [40] CARBO, M. ; ADELHA, p. ; CIEPLIK, M. ; KROON, P. ; MOURAO, C. ; KIEL, J.: Handling, storage and large-scale co-firing of torrefied biomass pellets. In: *IEA CCC - 5th workshop on cofiring biomass with coal*. Drax, Vereinigtes Königreich, September 2015
- [41] BATIDZIRAI, B. ; MIGNOT, A.P.R. ; SCHAKEL, W.B. ; JUNGINGER, H.M. ; FAAIJ, A.P.C.: Biomass torrefaction technology: Techno-economic status and future prospects. In: *Energy* (2013), S. 1–19
- [42] GIL, J.: Optimization of cereal straw torrefaction and pelletisation. In: *IEA CCC - 5th workshop on cofiring biomass with coal*. Drax, Vereinigtes Königreich, September 2015
- [43] DANZ, P. ; RICHTER, M.: Optimization of torrefaction with focus on grindability. In: *IEA CCC - 3rd workshop on cofiring biomass with coal*. Groningen, Niederlande, Juni 2013
- [44] TRATTNER, K.: Andritz Torrefaction Technologies. In: *4th Central european biomass conference*. Graz, Austria, Januar 2014

-
- [45] TOPELL: Topell on Torrefaction. In: *IEA CCC - 2nd workshop on cofiring biomass with coal*. Groningen, Niederlande, März 2012
- [46] KOPPEJAN, J. ; SOKHANSANJ, S. ; MELIN, S. ; MADRALI, S.: Status overview of torrefaction technologies / IEA Bioenergy Task 32. 2012. – Forschungsbericht
- [47] HENDERSON, C.: Cofiring of biomass in coal-fired power plants - European experience. In: *FCO/IEA CCC workshops on policy and investment frameworks*. China, Januar 2015
- [48] KHODAYARI, R.: Vattenfall strategy and experiences on cofiring of biomass and coal. In: *IEA CCC - 2nd Biomass Cofiring Workshop*. Kopenhagen, Dänemark, März 2012
- [49] DUSAN, S.: Black Pellets Verification Programme. In: *Solander Symposium Pitea*. 2011
- [50] TOPELL ENERGY (HRSG.): *Topell energy - cofiring*. <http://www.topellenergy.com/applications/co-firing/>. Version: Oktober 2015
- [51] ECN: *Successful test with innovative renewable energy source at Amer power plant*. www.ecn.nl/nl/nieuws/item/successful-test-with-innovative-renewable-energy-source-at-amer-power-plant/. Version: Oktober 2015
- [52] INTERNATIONAL BIOMASS TORREFACTION COUNCIL: *Performance in Torrefaction*. Online. <http://www.biomassstorrefaction.org/wp-content/uploads/2014/05/-Presentation-IBTC-members.pdf>. Version: Oktober 2015
- [53] O'CONNOR, D.: Filed tests of torrefied wood at Gulf power's Plant Scholz. In: *IEA CCC - 4th workshop on cofiring biomass with coal*. State College, PA, USA, November 2014
- [54] WILD, M.: Torrefaction - Status of selected technologies, standardisation, safety along the supply chain. In: *IEA CCC - 3rd workshop on cofiring biomass with coal*. Groningen, Niederlande, Juni 2013
- [55] BERGMAN, P.C.A. ; BOERSMA, A.R. ; ZWART, R.W.R. ; KIEL, J.H.A.: Torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations / ECN Biomass. 2005. – Forschungsbericht
- [56] UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE: *Clarifications on definition of biomass and consideration of changes in carbon pools due to CDM project activity*. Online. <http://cdm.unfccc.int/EB/020/eb20repan08.pdf>. Version: Oktober 2005

-
- [57] KALTSCHMITT, M. (Hrsg.) ; HARTMANN, H. (Hrsg.) ; HOFBAUER, H. (Hrsg.): *Energie aus Biomasse*. 2. Auflage. Springer-Verlag, 2009
- [58] RAVEN, P. H. ; EICHHORN, E. R. F.: *Biology of plants*. 7. W. H. Freeman and Company, New York, 2005
- [59] CHEN, W. H. ; TU, Y.J. ; SHENG, H. K.: Disruption of sugarcane bagasse lignocellulosic structure by means of dilute sulfuric acid with microwave-assisted heating. In: *Applied Energy* 88 (2011), S. 2726 – 2734
- [60] BATES, R. B.: *Modeling the coupled effects of heat transfer, thermochemistry and kinetics during biomass torrefaction*, Massachusetts Institute of Technology, Diplomarbeit, 2012
- [61] NAG, A.: *Biosystems Engineering*. McGraw-Hill, New York, 2010
- [62] BALAT, M ; BALAT, H ; ÖZ, C.: Progress in bioethanol processing. In: *Progress in Energy and Combustion Science* 34 (2008), S. 551 – 573
- [63] MOHAN, D. ; PITTMAN, C.U. ; STEELE, P.H.: Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review. In: *Energy Fuel* 20 (2006), S. 848 – 889
- [64] CHEN, W. H. ; KUO, P.C.: Torrefaction and co-torrefaction characterization of hemicellulose, cellulose and lignin as well as torrefaction of some basic constituents in biomass. In: *Energy* 36 (2011), S. 803 – 811
- [65] CHEN, W. H. ; CHENG, W. Y. ; LU, K M. ; HUANG, Y. P.: An evaluation on improvement of pulverized biomass property for solid fuel through torrefaction. In: *Applied Energy* 88 (2011), S. 3636 – 3644
- [66] FAGERNAS, L. ; BRAMMER, J. ; LAUER, M. ; VERHOEFF, F.: Drying of biomass for second generation synfuel production. In: *Biomass and Bioenergy* 34 (2010), S. 1267 – 1277
- [67] MACIEJEWSKA, A. ; VERINGA, H. ; SANDERS, J. ; PETEVES, S. D.: Co-firing of biomass with coal: Constraints and role of biomass pre-treatment / European Commission Directorate General Joint Research Center: Institute for Energy. 2006. – Forschungsbericht
- [68] DONAHUE, C. J. ; RAIS, E. A.: Proximate Analysis of Coal. In: *Journal of Chemical Education* 86 (2009), S. 222

-
- [69] BRIDGEMAN, T.G. ; JONES, J.M. ; SHIELD, I. ; WILLIAMS, P.T.: Torrefaction of reed canary grass, wheat straw and willow to enhance solid fuel qualities and combustion properties. In: *Fuel* 87 (2008), S. 844 – 856
- [70] BASU, Prabir: *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction - Practical Design and Theory*. Second Edition. Elsevier, 2013
- [71] KOUKIOS, E. G. ; MAVROKOUKOULAKIS, J. ; ABATZOGLOU, N.: Energy densification of biomass. In: *Proceedings of the 1st National Conference on soft energy forms, Thessaloniki* (1982)
- [72] TUMULURU, J. S. ; SOKHANSANJ, S. ; HESS, J. R. ; WRIGHT, C. J. ; BAARDMAN, R. D.: A review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications. In: *Industrial Biotechnology* 5 (2011), S. 384 – 491
- [73] PHANPHANICH, M. ; MANI, S.: Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass. In: *Bioresource Technology* 102 (2011), S. 1246 – 1253
- [74] REPELLIN, V. ; GOVIN, A. ; ROLLAND, M. ; GUYONNET, R.: Energy requirement for fine grinding of torrefied wood. In: *Biomass and Bioenergy* 34 (2010), S. 923–930
- [75] ARIAS, B. ; PEVIDA, C. ; FERMOSE, J. ; PLAZA, M. ; RUBIERA, F. ; PIS, J.: Influence of torrefaction on the grindability and reactivity of woody biomass. In: *Fuel Processing Technology* 89 (2008), S. 169 – 175
- [76] VAN D. STELT, M.J.C. van d. ; GERHAUSER, H. ; KIEL, J.H.A. ; PTASINSKI, K.J.: Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review. In: *Biomass and Bioenergy* 35 (2011), S. 3748 – 3762
- [77] VAN LOO, S. (Hrsg.) ; KOPPEJAN, J. (Hrsg.): *The Handbook of Biomass Combustion and Co-Firing*. Earthscan, 2008
- [78] PENG, J. H. ; BI, X. T. ; LIM, C. J. ; SOKHANSANJ, S.: Study on density, hardness and moisture uptake of torrefied wood pellets. In: *Energy Fuel* 27 (2013), S. 967 – 974
- [79] SADAKA, S. ; NEGI, S.: Improvements of biomass physical and thermochemical characteristics via torrefaction process. In: *Environmental Progress and Sustainable Energy* 28 (2009), S. 427 – 434
- [80] ANDERSSON, M. ; TILLMAN, A. M.: Acetylation of jute: effects of strength, rot resistance and hydrophobicity. In: *Journal of Applied Polymer Science* 37 (1989), S. 3437 – 3447

-
- [81] LI, H. ; LIU, X. ; LEGROS, R. ; BI, X. T. ; LIM, J. ; SOKHANSANJ, S.: Torrefaction of sawdust in a fluidized bed reactor. In: *Bioresource Technology* 103 (2012), S. 453 – 458
- [82] PASTOROVA, I. ; ARISZ, P. W. ; BOON, J. J.: Preservation of D-glucose oligosaccharides in cellulose char. In: *Carbohydrate Research* 248 (1993), S. 151 – 165
- [83] FELFI, F. F. ; LUENGO, C. A. ; SUAREZ, J. A. ; BEATON, P. A.: Wood briquette torrefaction. In: *Energy for Sustainable Development* 3 (2005), S. 19 – 22
- [84] SHOULAIFAR, T. K. ; DEMARTINT, N. ; IVASKA, A. ; FARDIM, P. ; HUPA, M.: Measuring the concentration of carboxylic acid groups in torrefied spruce wood. In: *Bioresource Technology* 123 (2012), S. 338 – 343
- [85] LIPINSKY, E. S. ; ARCATE, J. R. ; REED, T. B.: Enhanced wood fuels via torrefaction. In: *American Chemical Society, Division of Fuel Chemistry* 47 (2002), S. 408 – 410
- [86] NDIBE, C. ; MAIER, J. ; SCHEFFKNECHT, G.: Combustion, cofiring and emissions characteristics of torrefied biomass in a drop tube reactor. In: *Biomass and Bioenergy* 79 (2015), S. 105 – 115
- [87] NDIBE, C. ; GRATHWOL, S. ; PANERU, M. ; MAIER, J. ; SCHEFFKNECHT, G.: Emissions reduction and deposits characteristics during cofiring of high shares of torrefied biomass in a 500 kW pulverized coal furnace. In: *Fuel* 156 (2015), S. 177 – 189
- [88] HAKKOU, M. ; PÉTRISSANS ; GÉRARDIN, P. ; ZOULALIAN, A.: Investigations of the reason for fungal durability of heat-treated beech wood. In: *Polymer degradation and stability* 91 (2006), S. 393 – 397
- [89] STELTE, W. ; CLEMONS, C. ; HOLM, J. K. ; SANADI, A. R. ; SHANG, L. ; AHRENFELDT, J.: Pelletizing properties of torrefied spruce. In: *Biomass and Bioenergy* 35 (2011), S. 4690 – 4698
- [90] HÅKANSSON, K ; NORDIN, A ; NORDWAEGER, M. ; OLOFSSON, I. ; POMMER, L.: *Method of cooling torrefied material*. 2012. - Patentschrift
- [91] GRASSI, G.: Beyond energy: emerging opportunities in the bio-based economy. Where is tomorrow's market for value-added bio based product. In: *Global Bioenergy Congress*. Amsterdam, Niederlande, 2012

-
- [92] PRINS, M.J.: *Thermodynamic analysis of biomass gasification and torrefaction*, Eindhoven University of Technology, Diss., 2005
- [93] ZWART, R. W. R. ; BOERRIGTER, H. ; DRIFT, A. V. D.: The impact of biomass pretreatment on the feasibility of overseas biomass conversion to Fischer-Tropsch products. In: *Energy Fuels* 20 (2006), S. 2192
- [94] PRINS, M. J. ; PTASINSKI, K. J. ; JANSSEN, F. J. J. G.: Torrefaction of wood, Part 2. Analysis of products. In: *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 77 (2006), S. 35 – 40
- [95] PENG, J. H. ; BI, X. T. ; SOKHANSANJ, S.: Development of torrefaction kinetics for British Columbia softwoods. In: *International Journal of Chemical Reactor Engineering* 1 (2012), S. 1542 – 6580
- [96] CHEW, J. J. ; DOSHI, V.: Recent advances in biomass pretreatment - Torrefaction fundamentals and technology. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011), S. 4212 – 4222
- [97] PROTEUS SOLUTIONS: *Die Steinkohleumlage*. Online. <https://www.proteus-solutions.de/~Unternehmen/News-PermaLink:tM.F04!sM.NI41!Article.961411.asp>. Version: November 2015
- [98] EVERTS, B.: *Evaluation of drying processes for biomass co-firing in coal fired power plants*, TUHH, Diss., unpublished
- [99] BÜHLER AG, SCHWEIZ (Hrsg.): *Hammermühle Granulex (TM) - Produktbroschüre*. Bühler AG, Schweiz
- [100] Feedtech Int B.: *GHM Hammer Mill*. Online. <http://www.feedtechinternational.com/ghm-hammer-mill.html>. Version: Dezember 2015
- [101] TEMMERMAN, M. ; JENSEN, P. D. ; HÉBERT, J.: Von Rittinger theory adapted to wood chip and pellet milling, in a laboratory scale hammermill. In: *Biomass and Bioenergy* 56 (2013), S. 70 – 81
- [102] BRIDGEMAN, T.G. ; JONES, J.M. ; WILLIAMS, A. ; WALDRON, DJ: An investigation of the grindability of two torrefied energy crops. In: *Fuel* 89 (2010), S. 3911 – 3918
- [103] BOND, F.C: The third theory of comminution. In: *Transactions of the Metallurgical Society of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers* 193 (1952), S. 484 – 494
- [104] BOND, F. C.: Crushing and grinding calculations: Part I. In: *British Chemical Engineering* 6 (1961), S. 378 – 385

-
- [105] BOND, F. C.: Crushing and grinding calculations. In: *CIM (Canadian Institute of mining, metallurgy and petroleum) Bulletin* 47 (1954), S. 466 – 472
- [106] MCINTYRE, A. ; PLITT, L. R.: The interrelationship between Bond and Hardgrove grindabilities. In: *CIM (Canadian Institute of mining, metallurgy and petroleum) Bulletin* (1980), S. 145 – 155
- [107] KOLLMANN, F.: Rechnerische Verfolgung der künstlichen Holz Trocknung. In: *Forschung auf dem Gebiet des Ingenieurwesens* 4 (1935), S. 169 – 174
- [108] KONIDIS, J.: *Design of Direct Heated Rotary Dryers*, Department of Mechanical Engineering, Concordia University Montréal, Québec, Diplomarbeit, 1984
- [109] PONNDORF ANLAGENBAU GMBH KASSEL: *Persönliche Information von Herrn Dr. Rödig*. 2013
- [110] VDI GESELLSCHAFT (Hrsg.): *VDI-Wärmeatlas*. 10. Auflage. Springer Berlin Heidelberg, 2006
- [111] SONG, Y.: *Solids transportation, heat and mass transfer in rotary dryers*, University of Ottawa, Kanada, Diplomarbeit, 2003
- [112] HIRSCHBERG, Hans G.: *Handbuch Verfahrenstechnik und Anlagenbau: Chemie, Technik und Wirtschaftlichkeit*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1999
- [113] BASU, P. ; DHUNGA, A. ; RAO, S. ; ARCHARYA, B.: Effect of oxygen presence in torrefier. In: *Journal of the Energy Institute* 86 (2013), S. 171 – 176
- [114] UEMURA, Y. ; OMAR, W. ; OTHMAN, N. A. ; YUSUP, S. ; TSUTSUI, T.: Torrefaction of oil palm EFB in the presence of oxygen. In: *Fuel* 103 (2013), S. 156 – 160
- [115] FANG, M. X. ; SHEN, D. K. ; LI, Y. X. ; YU, C. J. ; LUO, Z. Y. ; CEN, K. F.: Kinetic study on pyrolysis and combustion of wood under different oxygen concentrations by using TG-FTIR analysis. In: *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 77 (2006), S. 22 – 27
- [116] OHLINGER, A. ; FÖRSTER, M. ; KNEER, R.: Torrefaction of beechwood: A parametric study including heat of reaction and grindability. In: *Fuel* 104 (2013), S. 607 – 613
- [117] VAN DER STELT, M. J. C.: *Chemistry and reaction kinetics of biowaste torrefaction*, Technische Universität Eindhoven, Niederlande, Diss., 2011

-
- [118] DI BLASI, C.: Modelling chemical and pyhysical processes of wood and biomass pyrolysis. In: *Progress in Energy and Combustion Science* 34 (2008), S. 47 – 90
- [119] BLASI, C. D. ; LANZETTA, M.: Intrinsic kinetics of isothermal xylan degradation in inert atmosphere. In: *Jornal of Analytical and Applied Pyrolysis* 40-41 (1997), S. 287–303
- [120] BERGMAN, P.C.A. ; BOERSMA, A.R. ; KIEL, J.H.A. ; PRINS, M.J. ; PTASINSKI, K.J. ; JANSSEN, F.J.J.G.: Torrefaction for entrained-flow gasification of biomass / Energy Research Center of the Netherlands (ENC). 2004. – Forschungsbericht
- [121] REPELLIN, V. ; GOVIN, A. ; ROLLAND, M. ; GUYONNET, R.: Modelling anhydrous weight loss of wood chips during torrefaction in a pilot kiln. In: *Biomass and Bioenergy* 34 (2010), S. 602 – 609
- [122] PRINS, M. J. ; PTASINSKI, K. J. ; JANSSEN, F. J. J. G.: Torrefaction of wood: Part 1. Weight loss kinetics. In: *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 77 (2006), S. 28 – 34
- [123] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (HRSG.): *A.S.T.M. Standards on Coal and Coke*. 1959
- [124] AMANDUS KAHL GMBH & CO. KG: *Persönliches Gespräch von Herrn T. Kraft mit Herrn Prof. Dr.-Ing. W. Sitzmann*. 2015
- [125] SPATH, P. ; MANN, M. ; KERR, D.: Life cycle assessment of coal-fired power production / National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado. 1999. – Forschungsbericht
- [126] U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION: *Independant statistics and analysis - U.S. Energy Information Administration*. Online. <http://www.eia.gov>. Version: November 2015
- [127] UMWELT PAKT BAYERN: *Infozentrum Umweltwirtschaft - Berechnung der CO₂ Emissionen*. Online. http://www.izu.bayern.de/praxis/detail_praxis.php?pid=0203010100217. Version: Oktober 2015
- [128] EBERHARDINGER, A. ; WARKOTSCH, W. ; ZORMAIER, F. ; SCHARDT, M. ; HUBER, T. ; ZIMMER, B.: Prozessanalyse und Ökobilanzierung der Bereitstellung von Waldhackgut. / TU München, Freising. 2009. – Forschungsbericht
- [129] ECOTRANSIT: *EcoTransIT - Homepage*. Online. <http://www.ecotransit.org>. Version: Oktober 2015



[130] GEORGIA BIOMASS: *Georgia Biomass - Homepage*. Online. <http://www.gabiomass.com/>. Version: Oktober 2015

ANHANG

A.1 PROZESSSCHALTBILDER

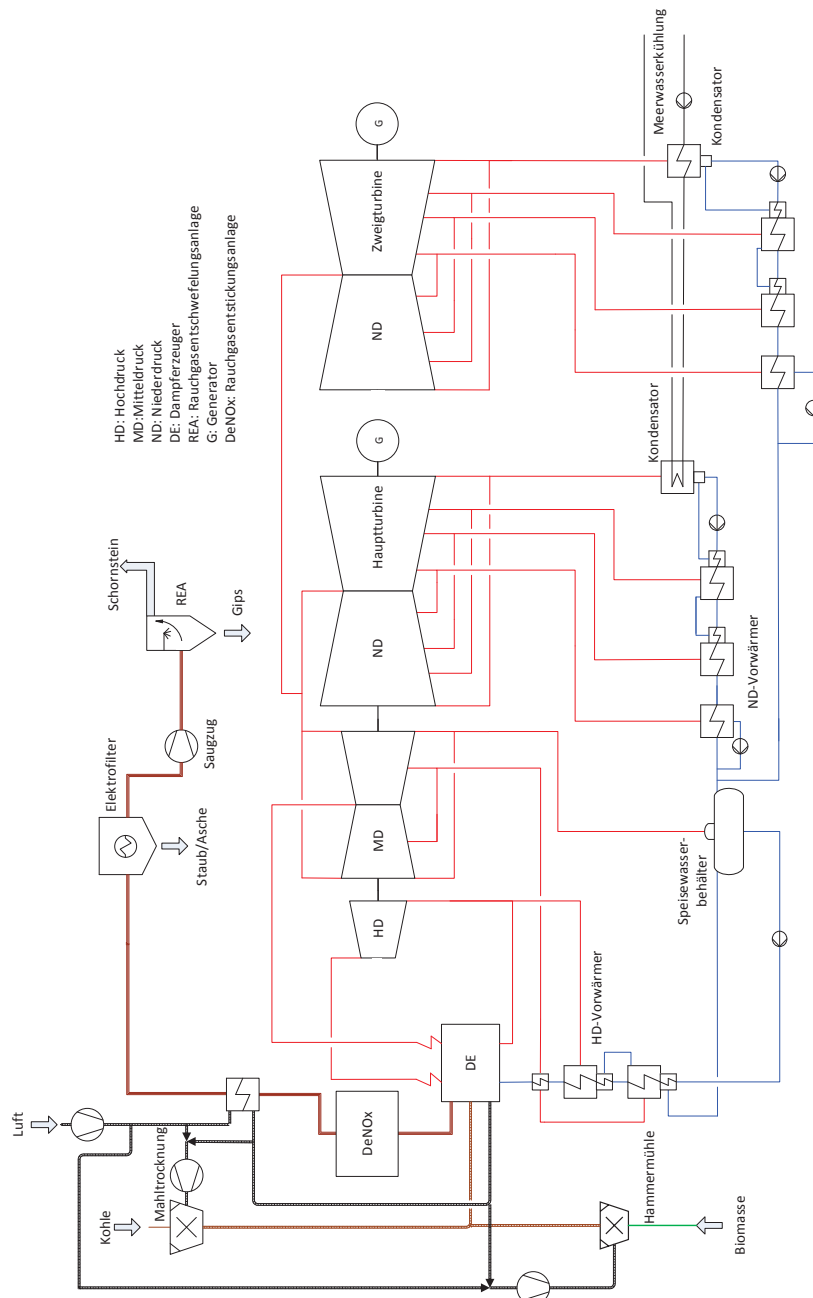


Abbildung 0.1: Vereinfachtes Prozessschaltbild der Kraftwerksanlage, ergänzt durch eine Hammermühle zur Biomasse-mahlung - Varianten Import_AWL0/15/30

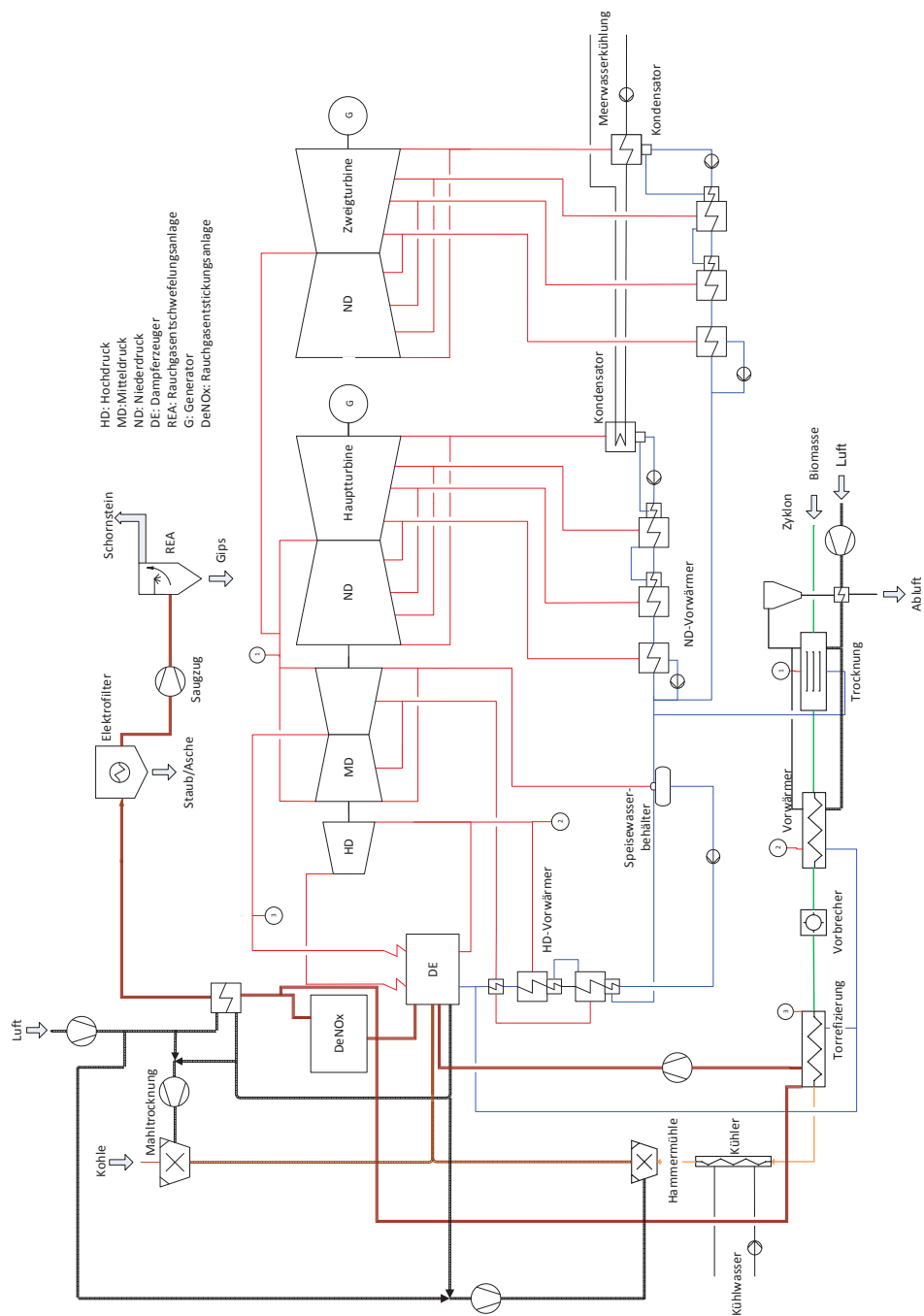


Abbildung 0.2: Vereinfachtes Prozessschaltbild der in den Kraftwerksprozess integrierten Vorbehandlung von Biomasse mit dampfbeheizter Torrefizierung; zur Aufheizung der Biomasse in zwei Stufen wurde zwischen Trocknung und Torrefizierung ein zusätzlicher Holzvorwärmer ergänzt - Variante IntegDampfVW_AWL

A.2 ERGEBNISSE TORREFIZIERUNGSREAKTOR

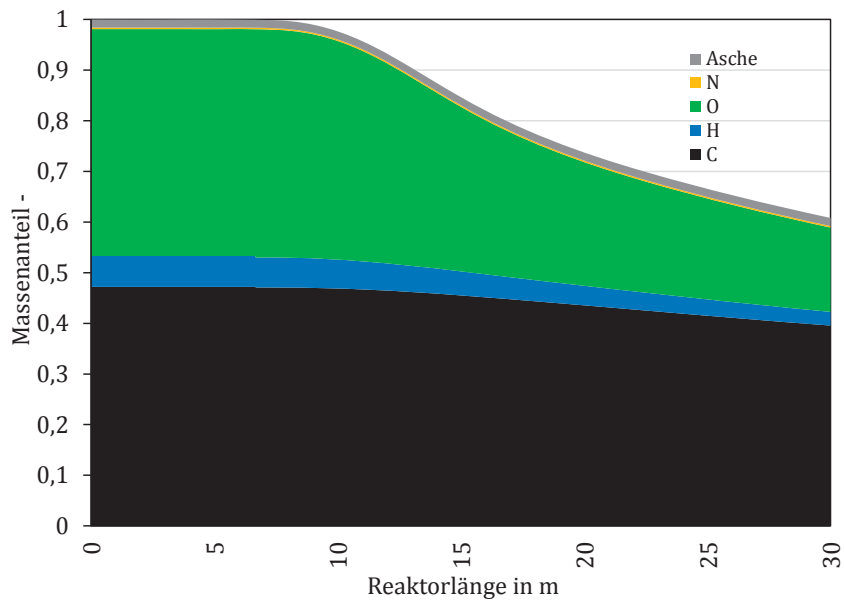


Abbildung 0.3: Massenanteile der elementaren Bestandteile sowie der Asche im festen Torrefizierungsprodukt in Abhängigkeit von der Reaktorlänge

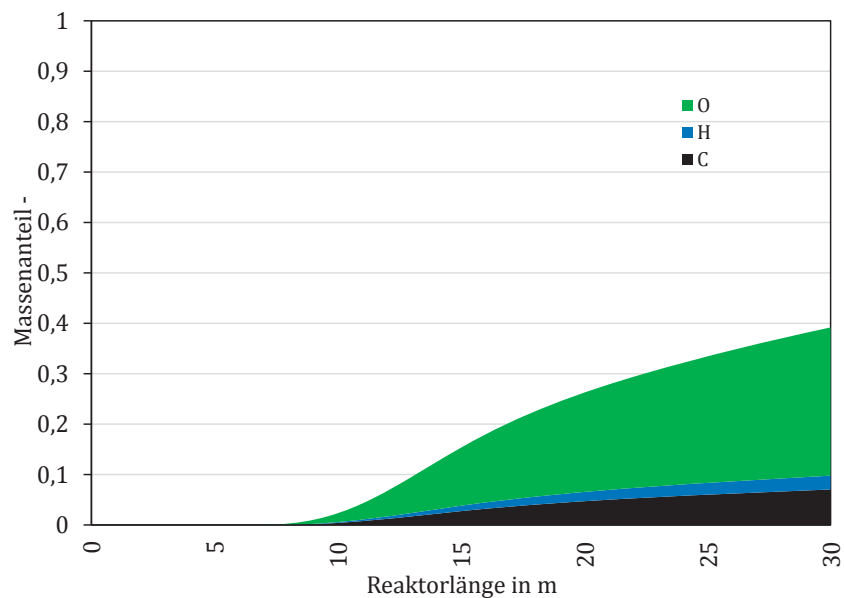


Abbildung 0.4: Massenanteile der elementaren Bestandteile im gasförmigen Torrefizierungsprodukt in Abhängigkeit von der Reaktorlänge; bezogen auf die insgesamt eingesetzte Trockenmasse

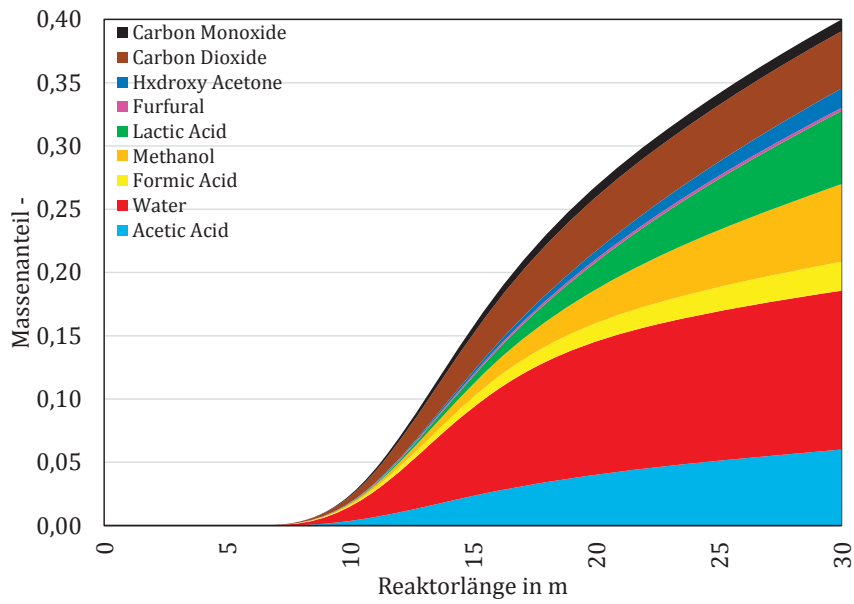


Abbildung 0.5: Massenanteile der molekularen Bestandteile im gasförmigen Torrefizierungsprodukt in Abhängigkeit von der Reaktorlänge; bezogen auf die insgesamt eingesetzte Trockenmasse

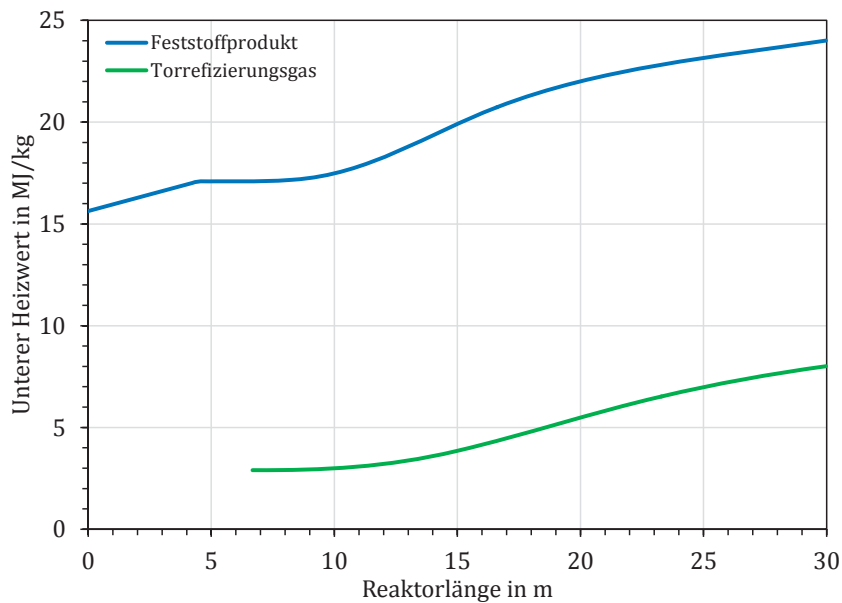


Abbildung 0.6: Unterer Heizwert des Feststoffprodukts und des Torrefizierungsgases in Abhängigkeit von der Reaktorlänge

A.3 ERGEBNISSE DAMPFBEHEIZTE TORREFIZIERUNG OHNE ZUSÄTZLICHEN HOLZVORWÄRMER

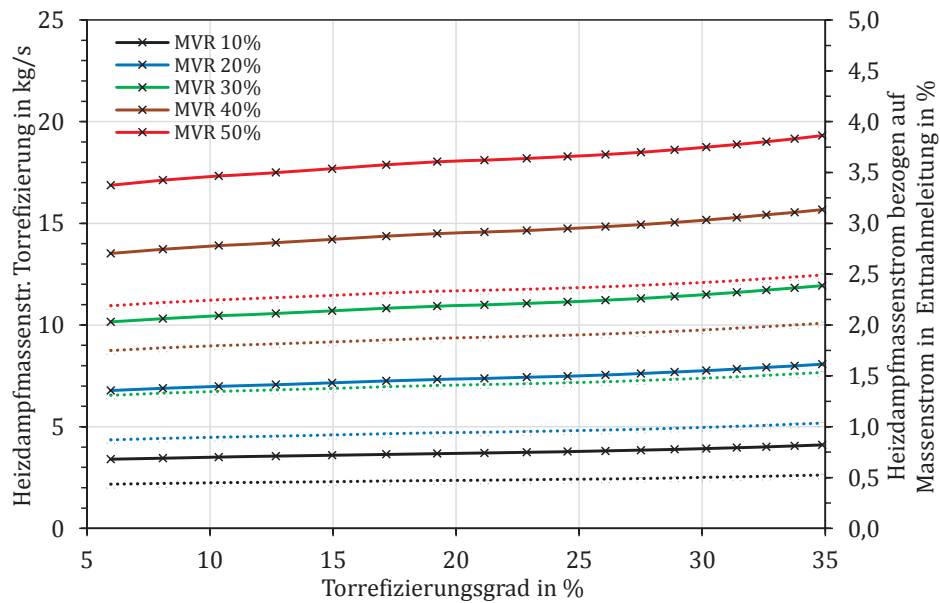


Abbildung 0.7: Absoluter und auf den Massenstrom in der Frischdampfleitung bezogener Heizdampfmasenstr. zum Torrefizierungsreaktor für verschiedene Mitverbrennungsraten und Torrefizierungsgrade; durchgezogene Linie beschreibt absolute Werte, Punktlinie bezogene Werte

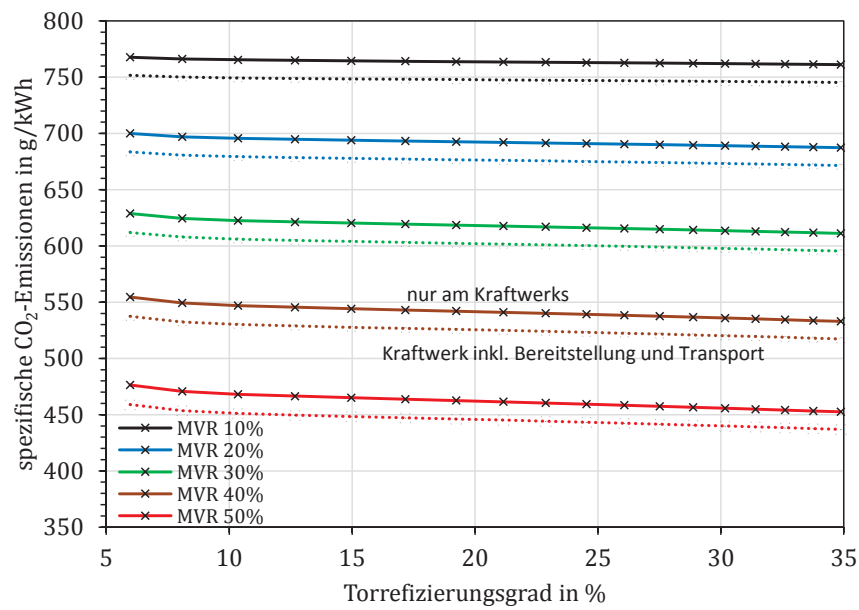


Abbildung 0.8: Spezifische CO₂-Emissionen der Kraftwerksanlage mit integrierter, dampfbeheizter Torrefizierung mit und ohne Brennstoffbereitstellung und Transport für verschiedene Mitverbrennungsraten und Torrefizierungsgrade

A.4 ERGEBNISSE DAMPFBEHEIZTE TORREFIZIERUNG MIT ZUSÄTZLICHEM HOLZVORWÄRMER

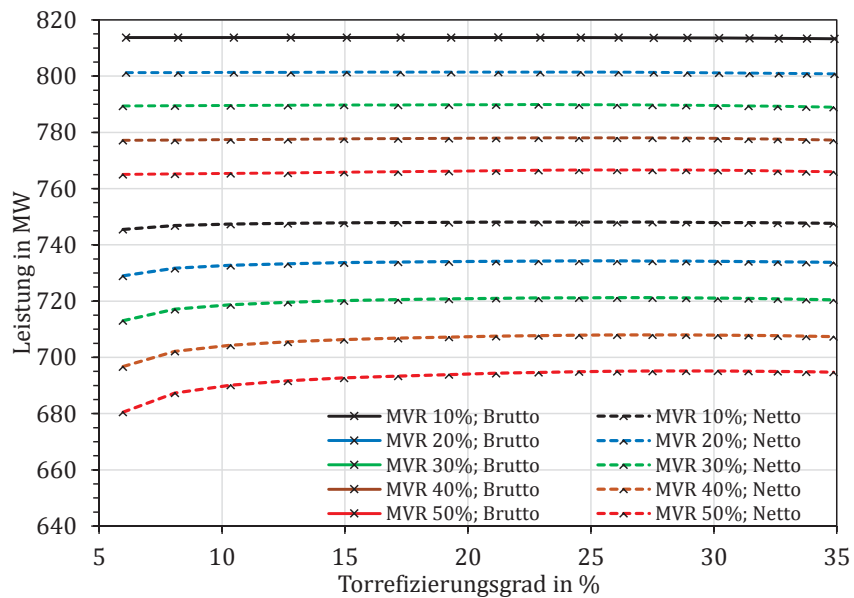


Abbildung 0.9: Netto- und Bruttoleistung der Kraftwerksanlage mit integrierter, dampfbeheizter Torrefizierung und zusätzlicher Holzvorwärmung für verschiedene Mitverbrennungsraten und Torrefizierungsgrade

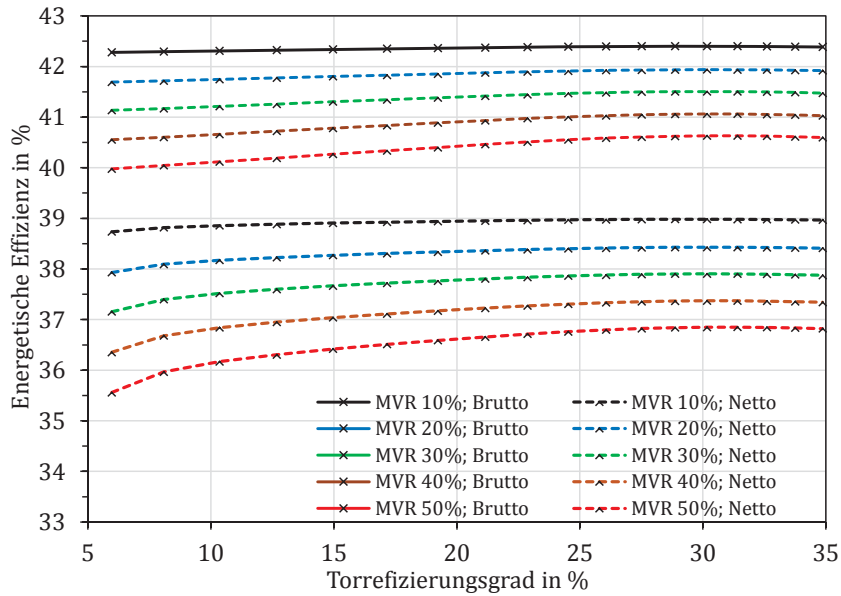


Abbildung 0.10: Netto- und Bruttoeffizienz der Kraftwerksanlage mit integrierter, dampfbeheizter Torrefizierung mit zusätzlicher Holzvorwärmung für verschiedene Mitverbrennungsraten und Torrefizierungsgrade

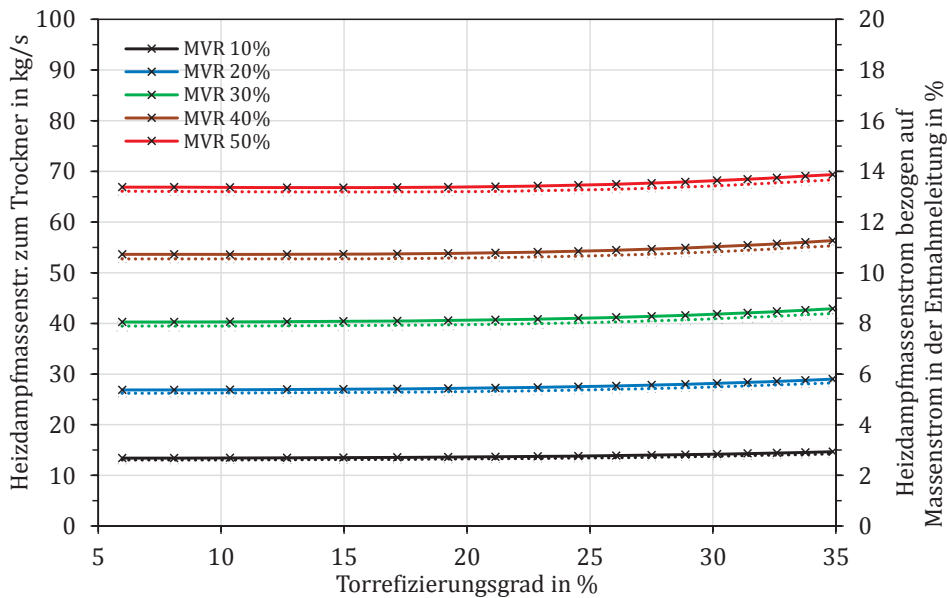


Abbildung 0.11: Absoluter und relativer Heizdampfmassenstrom zum Trockner der Kraftwerksanlage mit integrierter, dampfbeheizter Torrefizierung mit zusätzlicher Holzvorwärmung für verschiedene Mitverbrennungsraten und Torrefizierungsgrade

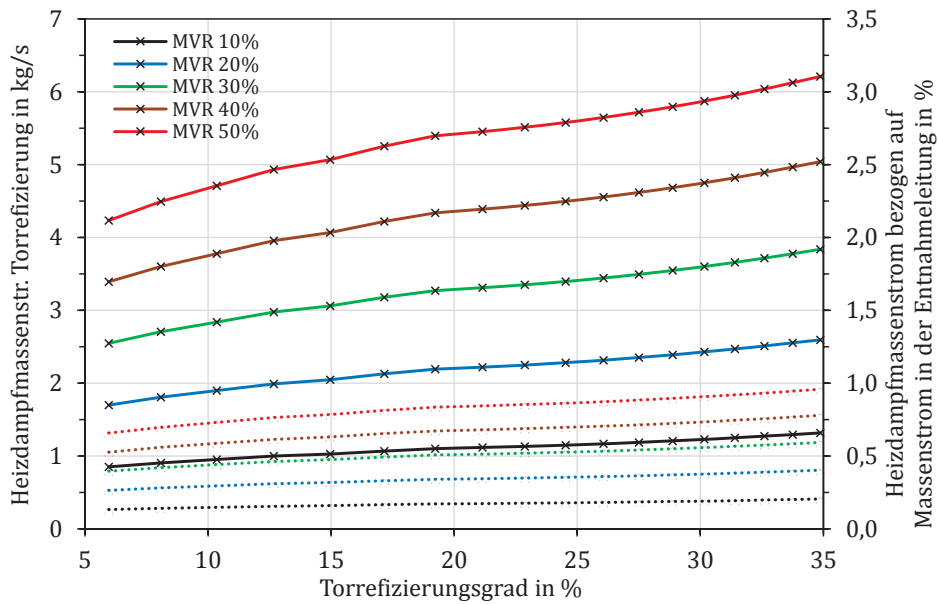


Abbildung 0.12: Absoluter und relativer Heizdampfmassestrom zum Torrefizierungsreaktor der Kraftwerksanlage mit integrierter, dampfbeheizter Torrefizierung mit zusätzlicher Holzvorwärmung für verschiedene Mitverbrennungsraten und Torrefizierungsgrade

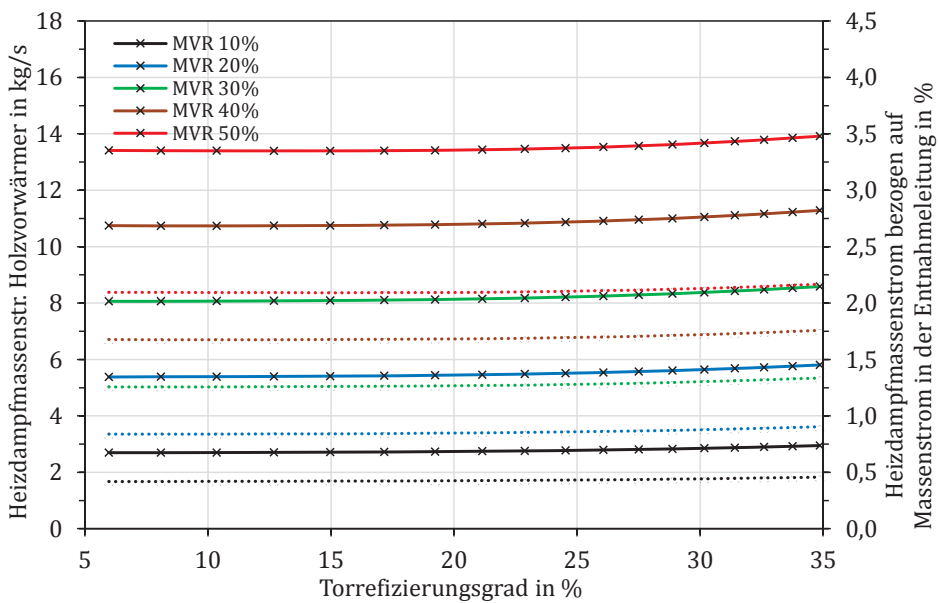


Abbildung 0.13: Absoluter und relativer Heizdampfmassestrom zum Vorwärmer der Kraftwerksanlage mit integrierter, dampfbeheizter Torrefizierung mit zusätzlicher Holzvorwärmung für verschiedene Mitverbrennungsraten und Torrefizierungsgrade

A.5 ERGEBNISSE RAUCHGASBEHEIZTE TORREFIZIERUNG

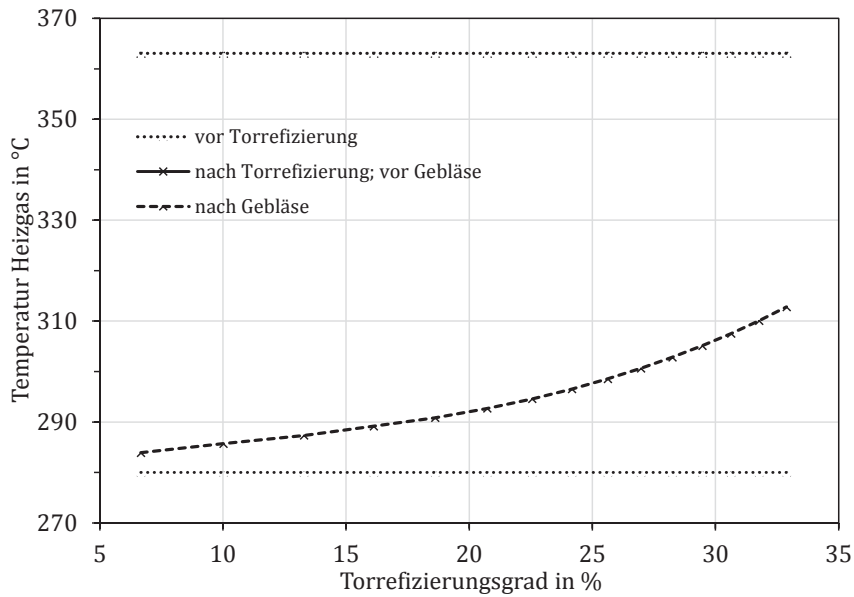


Abbildung 0.14: Heizgastemperatur an verschiedenen Stellen im Prozess für verschiedene Mitverbrennungsraten und Torrefizierungsgrade

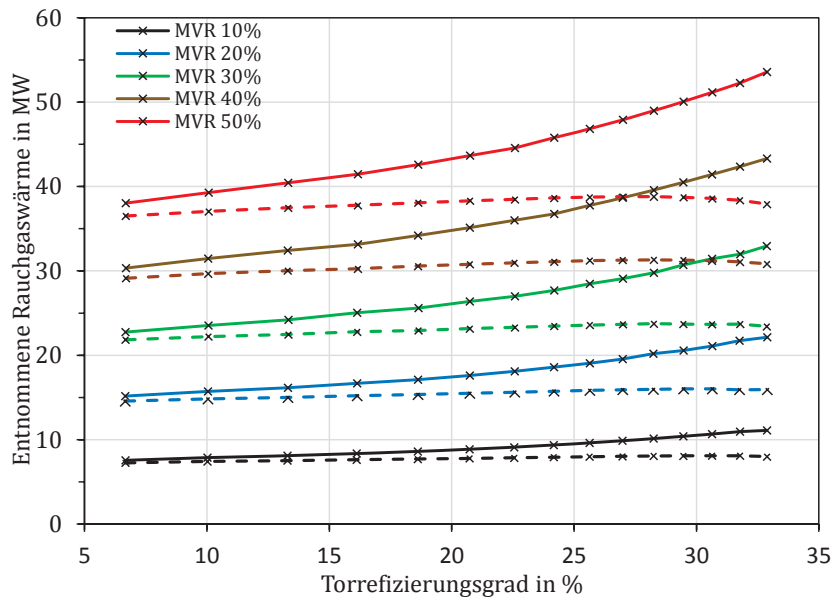


Abbildung 0.15: Dem Heizgas entnommene Wärmemenge mit und ohne Berücksichtigung des Heizgasgebläses für verschiedene Mitverbrennungsraten und Torrefizierungsgrade

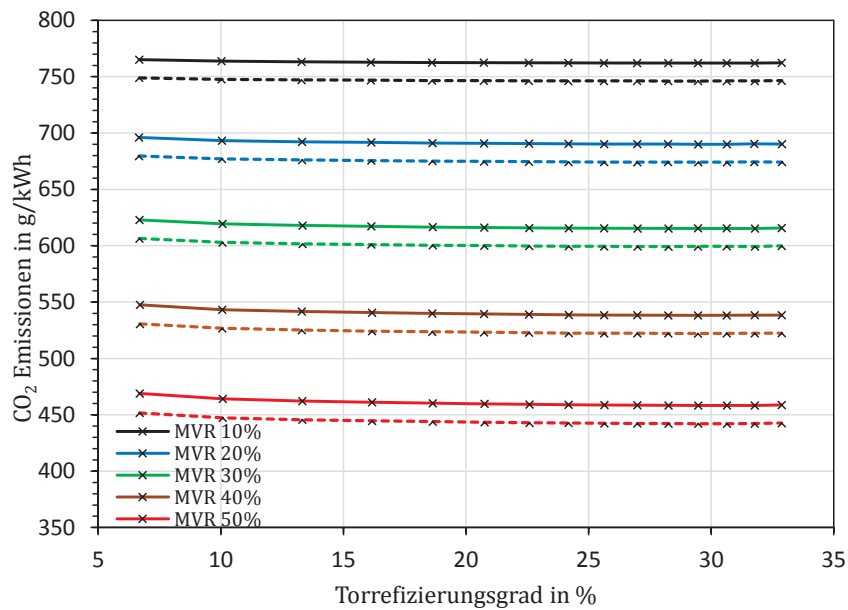


Abbildung 0.16: Spezifische CO₂-Emissionen der Kraftwerksanlage mit integrierter, rauchgasbeheizter Torrefizierung für verschiedene Mitverbrennungsraten und Torrefizierungsgrade

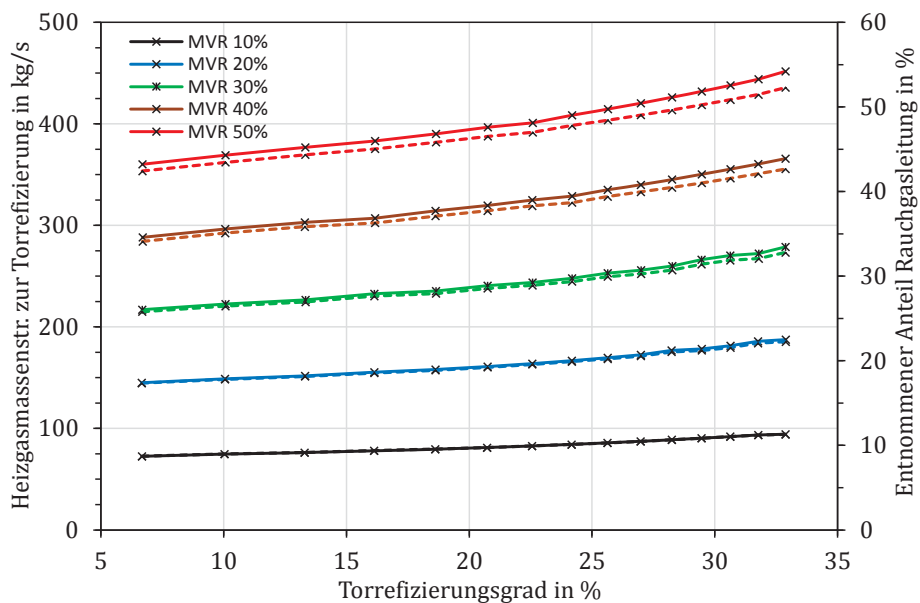


Abbildung 0.17: Absoluter und relativer Heizgasmassenstrom zur Torrefizierung bei der Kraftwerksanlage mit integrierter, rauchgasbeheizter Torrefizierung für verschiedene Mitverbrennungsraten und Torrefizierungsgrade

A.6 ENERGIEBEDARF DER EINZELANLAGEN

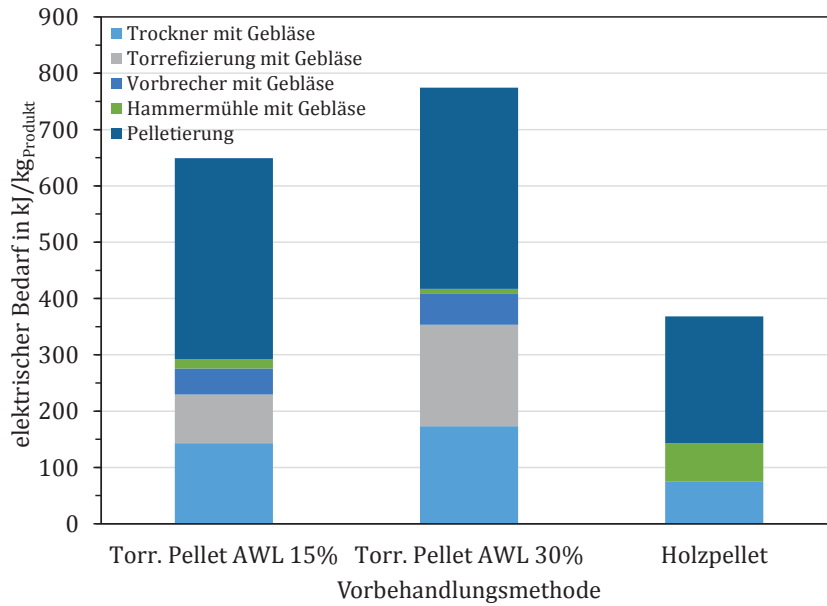


Abbildung 0.18: Elektrischer Energiebedarf zur Erzeugung von nicht torrefizierten Holzpellets und unterschiedlich intensiv torrefizierter Holzpellets

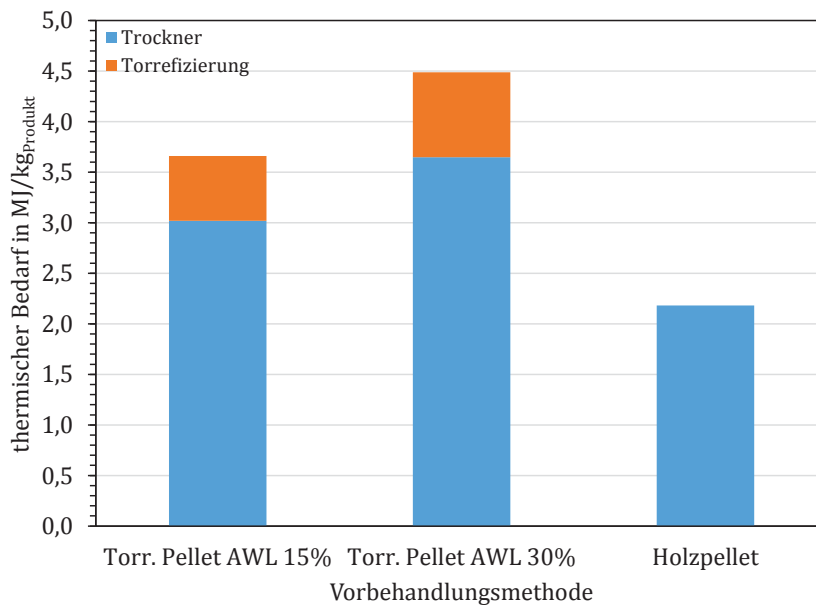


Abbildung 0.19: Thermischer Energiebedarf zur Erzeugung von nicht torrefizierten Holzpellets und unterschiedlich intensiv torrefizierter Holzpellets



LEBENS LAUF

Persönliche Daten

Name: Distler
Vorname: Tobias Peter
Geburtstag: 17. August 1985
Geburtsort: Neustadt an der Aisch

Schulischer Werdegang

09/1992 – 07/1996 Grundschule, Diespeck
09/1996 – 06/2005 Gymnasium, Neustadt an der Aisch

Zivildienst

09/2002 – 07/2003 Abfallwirtschaft und Untere Naturschutzbehörde
des Landkreises Neustadt an der Aisch

Studium

10/2006 – 12/2011 Studium der Energie- und Umwelttechnik
Technische Universität Hamburg-Harburg
Abschluss: Diplom-Ingenieur

Beruflicher Werdegang

03/2012 – 03/2016 Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Technische Universität Hamburg-Harburg
Institut für Energietechnik
seit 05/2016 Entwicklungsingenieur im Bereich F&E bei der
Amandus Kahl GmbH & Co. KG in Reinbek





