TECHNISCHE UNIVERSITÄT
BERGAKADEMIE FREIBERG

Institut für
Energieverfahrenstechnik
und Chemieingenieurwesen

Reiche Zeche • 09596 Freiberg • Tel. Sekretariat 03731/39-4511 • Fax 03731/39-4555 •
E-Mail evt@iec.tu-freiberg.de

Abschlussbericht

Ermittlung konsistenter Stoffdaten zur Biomassepyrolyse im Hinblick auf die Validierung, Auslegung und den Betrieb labor-, kleintechnischer und technischer Vergasungsanlagen

Kurztitel: Stoffdaten Biomassepyrolyse

Gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV)

FKZ: 22016006

Bearbeitungszeitraum: 01.11.2006 – 31.12.2009

Freiberg, den 07.12.2010

Auftraggeber: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.
Hofplatz 1
18276 Gülzow

Geschäftsführer:
Dr.-Ing. A. Schütte

Auftragnehmer: TU Bergakademie Freiberg
Institut für Energieverfahrenstechnik
und Chemieingenieurwesen
Fuchsmühlenweg 9 (Haus 1)
09596 Freiberg

Projektverantwortlicher:
Prof. Dr.-Ing. B. Meyer

Projektbearbeiter:
Dipl.-Ing. D. Reichel

Forschungsvorhaben:
04010274

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz unter dem Förderkennzeichen 22016006 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis VII
1 Einleitung 11
2 Wissenschaftlich-technische Zielstellung 13
3 Vorgehensweise 15
3.1 Biomasseauswahl und brennstofftechnische Charakterisierung (AP II) 15
3.1.1 Vorgehensweise bei der Biomasseauswahl 15
3.1.2 Ausgewählte Biomassen 17
3.1.3 Vorgehensweise bei der brennstofftechnischen Charakterisierung 19
3.1.4 Ergebnisse der brennstofftechnischen Charakterisierung 20
3.1.5 Stoffgruppenzusammensetzung der Biomassen 25
3.2 Planung, Errichtung und Inbetriebnahme der Pyrolyseanlage (AP I) 29
3.2.1 Anforderungen an eine Anlage zur Bilanzierung der Biomassepyrolyse 29
3.2.2 Bewertung der Eignung von verschiedenen Reaktorprinzipien für die Bilanzierung der Biomassepyrolyse 30
3.2.3 Festbettpyrolyseanlage (Labormaßstab) 37
3.2.4 Druckpyrolyseanlage 39
3.2.5 Sonstige technische Ausrüstung 48
3.3 Stoffliche und energetische Bilanzierung des Pyrolyseprozesses 49
3.3.1 Stoffbilanzen 50
3.3.2 Energiebilanzen 52
3.4 Parametervariationen bei der Pyrolyse verschiedener Biomassen 54
4 Ergebnisse und Diskussion 59
4.1 Stoffliche und energetische Bilanzierung des Pyrolyseprozesses 59
4.1.1 Wiederholbarkeit der Versuchsergebnisse 59
4.1.2 Einfluss der Prozesstemperatur 61
4.1.3 Einfluss des Systemdrucks 71
4.1.4 Einfluss der Aufheizgeschwindigkeit 81
4.1.5 Einfluss der Verweilzeit bei Pyrolyseendtemperatur 90
4.1.6 Einfluss der Brennstoffvorbereitung 93
4.1.7 Einfluss des Mischungsverhältnisses 95
4.1.8 Pyrolyseverhalten von Cellulose, Hemicellulose und Lignin 101
4.1.9 Besonderheiten bei der Pyrolyse von Maissilage 113

4.2 Korrelation von Produktverteilung / -eigenschaften mit Rohstoffparametern 115
4.2.1 Einfluss des Gehaltes an flüchtigen Bestandteilen 115
4.2.2 Einfluss des Gehalts an katalytisch aktiven Aschebestandteilen 117
4.3 Ergänzende thermoanalytische Untersuchungen 123
4.3.1 Einflussgrößen bei der Differential-Scanning-Kalorimetrie 123
4.3.2 Ergebnisse der Differential-Scanning-Kalorimetrie 126
4.3.3 Thermogravimetrie – Einfluss von Druck und Aufheizgeschwindigkeit 130
4.4 Systematisierung der Bilanzergebnisse – Datenbankerstellung (AP IVa) 137
4.4.1 Struktur der Datenbank „Biomassepyrolyse“ 137
4.5 Modellierung des Pyrolyseprozesses mit AspenPlus™ (AP IVb) 141
4.5.1 Allgemeine Modellbeschreibung 142
4.5.2 Datenbasis und Vorgehensweise bei der Modellierung 145
4.5.3 Ergebnisse der Pyrolysemodellierung 146
4.5.4 Vorgehensweise bei der Auswertung der Ergebnisse 148
4.5.5 Ergebnisse zur Modellierung der Biomassepyrolyse 151
4.5.6 Zusammenfassung/Ausblick zur Modellierung der Biomassepyrolyse 155
5 Zusammenfassung 157
6 Ausblick 167
Abbildungsverzeichnis 169
Tabellenverzeichnis 177
Literaturverzeichnis 179
Anhang .....

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungen

an	analysenfeucht
bar (Ü)	bar (Überdruck)
dest	destilliert
exp	experimentell
k.A.	keine Angabe
n.b.	nicht bestimmbar
n.n.	nicht nachweisbar
roh	Rohzustand
th	thermisch
wf	wasserfrei
waf	wasser- und aschefrei
AHG	Aufheizgeschwindigkeit
AP	Arbeitspaket
BioLog	Verbundvorhaben „Entwicklung, Erprobung und Demonstration neuer Logistikkonzepte für Biobrennstoffe“
BiomasseV	Biomasseverordnung
BM	Biomasse
BWL	Brennstoffwärmeleistung
CFB	Circulating Fluidised Bed (dt. Zirkulierende Wirbelschicht)
CUTEC	Clausthaler Umwelttechnik-Institut GmbH
DECOMB	Ausdruck in der Simulationssoftware ASPENplus^{TM} (steht für decomposition, dt. Zersetzung)
DMT	Deutsche Montantechnologie
DP	Durchschnittlicher Polymerisationsgrad
DPA	Druckpyrolyseanlage
DTG	Differentielle Thermogravimetrie
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EEWärmeG	Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz
EVA	Verbundvorhaben „Entwicklung und Vergleich von optimierten Anbausystemen für die landwirtschaftliche Produktion von Energiepflanzen unter den verschiedenen Standortbedingungen Deutschlands“
FB	Flüchtige Bestandteile
FB	Fluidised Bed (dt. Stationäre Wirbelschicht)
G-Lignin	Lignin, in dem der Guaiacyl-Baustein dominiert
G/S-Lignin	Lignin, in dem der Guaiacyl- und der Syringyl-Baustein dominieren
GPS	Ganzpflanzensilage
GP	Ganzpflanze
H-Lignin	Lignin, in dem der Hydroxyphenyl-Baustein dominiert
HP-TGA	High-pressure-thermogravimetry (Hochdruck-Thermogravimetrische Analyse)
IEC	Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen

IEKP	Integriertes Klima- und Energieprogramm
K	Kühlung
KFT	Karl-Fischer-Titration
KUP	Kurzumtriebsplantage
MFC	Massflowcontroller (dt. Massendurchflussregler)
MFM	Massflowmeter (dt. Massendurchflussmesser)
MR	Mischungsregel
MS	Microsoft
PTG	Pelletier- und Transportgesellschaft GmbH
RFA	Röntgenfloureszenzanalyse
RME	Rapsölmethylester (Biodiesel)
RT	Raumtemperatur
S-Lignin	Lignin, in dem der Syringyl-Baustein dominiert
STA	Simultane Thermische Analyse
TG	Thermogravimetrie (engl. thermogravimetry)
TG-DSC	Thermogravimetry-Differential-Scanning-Calorimetry
THF	Tetrahydrofuran
TLL	Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft
TS	Trockensubstanz
VBA	Visual Basic Applications

Symbole

m	Masse
n	Stoffmenge
q	spezifische Wärmemenge
x	Masseanteil
A	Ausbeute
A	Asche
C	Kohlenstoff
C_{Fix}	Fixer Kohlenstoff
H	Wasserstoff
H_U	Heizwert
H_O	Brennwert
M	Molare Masse
N	Stickstoff
O	Sauerstoff
Q	Wärmemenge
S_C	verbrennlicher Schwefel
V	Volumen

Indizes

chem	chemisch
i	fortlaufender Index
k	fortlaufender Index für die Gaskomponenten
phys	physikalisch
zu	zugeführt
BM	Biomasse
C	Kohlenstoff
E	Element
Gas	Pyrolysegas
Koks	Koks
Kond	Kondensat, gesamt
P	Produkt
Pyro	Pyrolyse
Öl	Teer/Öl
V	Verdampfung
ZW	Zersetzungswasser

1 Einleitung

Die energetische Nutzung von Biomasse gewinnt im Kontext mit einer nachhaltigen Energie- und Rohstoffversorgung sowie der Umstrukturierung der ländlichen Räume immer weiter an Bedeutung. Im Jahr 2009 betrug der Anteil erneuerbarer Energien am Primärenergieverbrauch Deutschlands 8,85 %, wovon Biomasse 75 % abdeckte */Fahl 2010/*. Bezüglich Endenergie wurden 417 PJ Wärme, 28,7 TWh Strom und 120 PJ Kraftstoffe (insbesondere RME als Biokraftstoff der 1. Generation) auf der Basis von Biomasse bereitgestellt */Lenz 2010/*. Die Rahmenbedingungen werden durch die anspruchsvollen klima- und energiepolitischen Ziele der Bundesregierung vorgegeben (IEKP: Integriertes Energie- und Klimaprogramm der Bundesregierung). Die wesentlichen Maßnahmen sind in den gerade in den letzten Jahren erlassenen Gesetzten und Verordnungen, wie dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), dem Erneuerbare-Energie-Wärmegesetz (EEWärmeG), der Biomasseverordnung (BiomasseV), dem Biokraftstoffquotengesetz oder der Biomassenachhaltigkeitsverordnung festgeschrieben und durch konkrete Zielvorgaben, wie z. B. die Senkung der Treibhausgasemissionen bis 2020 um 40 % gegenüber 1990 oder die Erhöhung der Biokraftstoffquote bis 2010 auf 5,75 % und bis 2020 auf 12,5 % untersetzt.

Um diese Ziele zu erreichen, müssen neue technische Biomassepotentiale erschlossen und die relevanten Biomassetechnologien weiterentwickelt werden. Ein Schlüsselprozess für die energetische Nutzung nachwachsender Festbrennstoffe ist deren thermochemische Wandlung, über die Strom und Wärme sowie veredelte Energieträger und Chemierohstoffe gewonnen werden können. Je nach Zielstellung werden dafür die Prozesse Verbrennung, Vergasung, Hydrierung und Torrefaction bzw. Pyrolyse sowie hydrothermaler Aufschluss genutzt. Besonders hervorzuheben ist der Prozess der Vergasung, der das größte Potential hinsichtlich Einsatzstoff- und Produktflexibilität sowie Anlagenkapazität aufweist. Die darauf aufbauenden BtL-Routen können damit substantiell zur Versorgung der Volkswirtschaft mit biogenen flüssigen synthetischen Kraftstoffen beitragen.

Ausgehend von den sehr komplexen Strukturen der Biomassen spielen bei den verschiedenen thermochemischen Stoffwandlungsvorgängen pyrolytische Zersetzungsreaktionen sowohl als Einzel- als auch als Teilprozess eine wesentliche Rolle. Die Pyrolyse als Einzelverfahren wird zur Holzkohlegewinnung und/oder zur Erzeugung von Flüssigprodukten wie Teer/Öl bzw. Essigsäure angewendet. Bei Stoffwandlungsprozessen wie Verbrennung und Vergasung ist die Pyrolyse der erste Schritt der Biomasseumwandlung und je nach Bedingungen/Prinzip kann der Pyrolyseschritt den Prozess selbst und die Produktqualität signifikant beeinflussen. In verschiedenen Verfahrensketten wird die Pyrolyse auch als thermochemische Aufbereitungsstufe räumlich getrennt vor Vergasungsprozessen genutzt (bioliq®, Carbo-V®).

Die detaillierte Kenntnis des thermochemischen Verhaltens der Biomassen während der Pyrolyse ist für die thermo- und fluiddynamische Prozessbeschreibung und damit für die Entwicklung und Auslegung von Konversionstechnologien und –verfahren unverzichtbar. Die Vorhersage des Pyrolyseverhaltens allein anhand von Standarduntersuchungen (z. B. der Immediatanalyse) ist aufgrund des breiten Spektrums verschiedener Biomassen mit stark variierenden Eigenschaften und physikalisch-chemischen Eigenschaften nicht möglich. Neben den Rohstoffeigenschaften beeinflussen auch die

gewählten Prozessparameter das thermochemische Verhalten der Biomassen maßgeblich. In der Fachliteratur ist für die Pyrolyse verschiedenster biogener Rohstoffe eine Vielzahl von Datenquellen zu finden, jedoch wird aufgrund des jeweiligen Forschungsschwerpunktes i.d.R. nur ein sehr begrenzter Parameterbereich untersucht. Ein weiteres Defizit in der verfügbaren Datenbasis besteht darin, dass häufig nicht alle Pyrolyseprodukte erfasst werden, wodurch die Bilanzierung des Pyrolyseprozesses nicht möglich ist. Darüber hinaus ist die Vergleichbarkeit von Datensätzen verschiedener Literaturquellen nicht gegeben, weil die Verteilung und die Eigenschaften der Pyrolyseprodukte neben den gewählten Prozessbedingungen maßgeblich von apparatetechnischen Gegebenheiten abhängen.

Das wissenschaftlich-technische Ziel des Vorhabens besteht darin, die Datenlage zur Biomassepyrolyse durch systematische Untersuchungen zu verbessern. Dabei werden einerseits Biomassen mit einem hohen technischen Potential und andererseits ein breites Spektrum an technisch relevanten Prozessbedingungen (Temperatur, Druck, Aufheizgeschwindigkeit) berücksichtigt. Auf dieser Basis werden konsistente Stoffdatensätze für die Biomassepyrolyse generiert, die ausgehend von den brennstofftechnischen Eigenschaften der untersuchten Biomassen die Pyrolyseproduktverteilung, die Pyrolyseproduktzusammensetzung und deren Energieinhalt umfassen.

2 Wissenschaftlich-technische Zielstellung

Das wissenschaftlich-technische Hauptziel des Vorhabens bestand in der experimentellen Ermittlung von belastbaren Stoffdaten für die Biomassepyrolyse, die im Weiteren die Abbildung des Prozesses mit Hilfe thermodynamischer Simulationssoftware bzw. u. U. eine Vorhersage des Pyrolyseverhaltens ermöglichen sollen. Dabei wurden im Einzelnen folgende Arbeitsziele verfolgt:

- Auslegung und Bau einer Versuchsanlage zur Bestimmung von Pyrolysebilanzen unter definierten Prozessbedingungen (AP1),
- Beschaffung, Aufbereitung und Charakterisierung von Probenmaterial (AP2),
- Ermittlung des Pyrolyseverhaltens für ein breites Spektrum an Biomassen und Erstellung der Stoff- und Energiebilanzen (AP3),
- Erstellung einer Datenbank aus den gewonnen Daten – Systematisierung (AP4),
- Modellierung der Biomassepyrolyse auf Basis der experimentellen Daten (AP5).

Nachfolgend wird der Inhalt der einzelnen Arbeitspakete kurz näher erläutert.

AP1: Auslegung und Bau einer Versuchsanlage

Die Ermittlung konsistenter Daten zu Produktverteilungen und -eigenschaften bei der Biomassepyrolyse verlangt, um die Vergleichbarkeit der Werte für verschiedene Einsatzstoffe zu gewährleisten, eine Versuchsanlage, die verschiedenen Anforderungen genügen muss. Somit ergab sich die Aufgabe eine derartige Anlage zu planen, zu bauen und in Betrieb zu nehmen, die es ermöglicht ein breites Spektrum von Prozessparametern (Temperatur, Druck, Aufheizgeschwindigkeit) zu realisieren und dabei eine möglichst vollständige Rückgewinnung der anfallenden Pyrolyseprodukte (Gas, Koks und Kondensat) zur vollständigen Bilanzierung des Prozesses gewährleistet. Die Konzeptentwicklung und Detailplanung erfolgt unter Berücksichtigung der prozessseitig gestellten Anforderungen sowie der notwendigen Produktmengen für die Durchführung der zur Bilanzierung nötigen Analysen.

AP2: Beschaffung, Aufbereitung und Charakterisierung von Probenmaterial

Projektrelevant sind die in Deutschland anbaufähigen land- und forstwirtschaftlichen Biomassen. Dazu gehören z. B. Reststoffe der Land-/Forstwirtschaft wie Stroh oder Waldrestholz aber auch speziell für die Energiegewinnung angebaute Biomasse wie Energiepflanzen (z. B. Mais, Triticale), Miscanthus oder Kurzumtriebsholz. Da nicht alle Biomassen im Rahmen des Projektes untersucht werden konnten, wurde zusammen mit der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft eine Rangfolge zur Relevanz der einzelnen Rohstoffe für die energetische Nutzung getroffen. Die gewählten Biomassen waren hinsichtlich ihrer brennstofftechnischen Eigenschaften (Elementar-, Immediatanalyse, Brennwert/Heizwert, Pyrolysewärme, Stoffgruppenzusammensetzung) zu charakterisieren. Um die Korrelation zwischen Biomassezusammensetzung und Pyrolyseproduktverteilung zu untersuchen, wurden die einzelnen Stoffgruppen der Biomasse (Hemicellulose, Cellulose, Lignin) in das Versuchsprogramm aufgenommen. Damit soll eine Übertragung der Versuchsergebnisse auch auf andere als die untersuchten Biomassen ermöglicht werden.

AP3 und AP4: Ermittlung des Pyrolyseverhaltens und Erstellung einer Datenbank

Der zu untersuchende Bereich an Prozessparametern für die Biomassepyrolyse soll ein breites Spektrum der für großtechnische Pyrolyse- und Vergasungsprozesse relevanten verfahrenstechnischen Parameter abdecken. Zu berücksichtigen sind dabei Temperaturen bis 800 °C, Drücke bis 30 bar und Aufheizgeschwindigkeiten die sowohl Festbett- als auch Wirbelschichtbedingungen widerspiegeln (1…500 K/min). Neben den Einflüssen der Prozessparameter sind auch die Auswirkung verschiedener Vorbehandlungsschritte (z. B. Silierung, Mahlung) und der Einsatz von Biomassemischungen zu untersuchen. Ziel der Versuche ist die Erstellung von geschlossenen Stoff- und Energiebilanzen und die Systematisierung der Ergebnisse in einer geeigneten Datenbank.

AP5: Modellierung der Biomassepyrolyse

Aus den gewonnenen Bilanzdaten für verschiedene Prozessparameter sind mit Hilfe thermodynamischer Simulationssoftware Prozessmodelle zu erstellen. Die Einbindung des Pyrolyseschrittes in die thermodynamische Berechnung technischer Biomassekonversionsanlagen lässt sich dabei insofern realisieren, dass eine Datenbank hinterlegt wird, die das Produktspektrum bei den gewünschten Prozessbedingungen erzeugt. Es wird somit ein Modell zur Beschreibung der bei der Pyrolyse ablaufenden Bruttoreaktionen angewendet. Durch die Untersuchungen der einzelnen Stoffgruppen der Biomasse soll die Modellierung des Pyrolyseprozesses auch für weitere Biomassen, deren Stoffgruppenzusammensetzung bekannt ist möglich werden.

3 Vorgehensweise

3.1 Biomasseauswahl und brennstofftechnische Charakterisierung (AP II)

Die für das Projekt ausgewählten Biomassen werden im nachfolgenden Kapitel dargestellt und hinsichtlich ihrer allgemeinen brennstofftechnischen Eigenschaften charakterisiert. Die Auswahl der Biomassen erfolgte in Zusammenarbeit mit der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft sowie unter der Berücksichtigung der Forschungsprojekte „Entwicklung und Vergleich von optimierten Anbausystemen für die landwirtschaftliche Produktion von Energiepflanzen unter den verschiedenen Standortbedingungen Deutschlands“ (Verbundvorhaben EVA) und „Entwicklung, Erprobung und Demonstration neuer Logistikkonzepte für Biobrennstoffe“ (Verbundvorhaben BioLog).

3.1.1 Vorgehensweise bei der Biomasseauswahl

Für das Projekt wurden lediglich in Deutschland anbaufähige land- und forstwirtschaftliche Biomassen berücksichtigt. Neben verschiedenen Holz- und Strohqualitäten sollten auch feste Bioenergieträger auf Basis von Energiepflanzen wie Energiegetreide (z. B. Triticale) sowie Silagen in die Untersuchungen einbezogen werden.

Für den Einsatz in großtechnischen Anlagen spielt die Verfügbarkeit bzw. die Bereitstellung der Biomasse eine bedeutende Rolle und stellt eine große Kostenposition dar. Daher sind bei der Rohstoffauswahl neben den brennstofftechnischen Eigenschaften verschiedene andere Kriterien wie technische Potentiale, Erntezeiträume, Handling (Lagerfähigkeit, Transportierbarkeit, Aufbereitungsmöglichkeiten) sowie die Eignung für Pyrolyse- und Vergasungsprozesse zu berücksichtigen.

Vetter */Vetter 2007/* geht hinsichtlich ihres zukünftigen Einsatzes für die energetische Biomassenutzung von folgender Rangfolge aus:

1. Waldholz
2. Weizenstroh
3. Ganzpflanzensilage (GPS, abgepresst: 50 % TS-Gehalt)

Eine detaillierte Rangfolge ist der Abbildung 3-1 zu entnehmen.

Aufgrund der Verknappung von preiswertem Waldrestholz und der Nutzungskonkurrenz mit Holzheizwerken und -heizkraftwerken rücken besonders Stroh und Ganzpflanzengetreide in den Fokus für den Einsatz in großtechnischen Vergasungsanlagen. Derzeit sind die Anbauflächen auf die einzelnen Getreidesorten prozentual wie folgt verteilt: Weizen 50 %, Gerste 20 %, Roggen und Triticale 20 % und Hafer 10 %. Weizen, Roggen und Triticale besitzen den Vorteil, dass sie bei der Ernte gleichmäßig ausgereift sind. Bei Gerste und Hafer ist dies nicht der Fall, weshalb sich höhere Chlor- und Kaliumgehalte einstellen. Vorteilhaft bei Gerste ist das breite Erntefenster. Das Korn-Stroh-Masseverhältnis beträgt ca. 0,9. Stroh weist in der Regel Trockensubstanzgehalte ≥ 86 Ma.-% auf. Hochhalmige Getreidesorten sind bei vorhandenem wirtschaftlichem Anreiz kurzfristig züchtbar (Korn-Stroh-Verhältnis von 1,1 - 1,3). Beim Dreschen des Getreides geht ca. ein Drittel des Strohs verloren. Ein weiterer Anteil verbleibt zur Erhaltung der Humusbilanz auf dem Feld. Der Rest des Strohs ist für eine

energetische Nutzung zugänglich. Der Strohertrag liegt somit bei ca. 3,5 bis 4 t/ha. Ganzpflanzengetreide weist Erträge von 12 t TS/ha auf.

Bezüglich der Logistik des Strohs wurde bisher der geringe Energieinhalt als problematisch angeführt, der sich infolge der geringen Stapeldichte der Quaderballen von 190 kg/m^3 ergibt. Mit neueren Quaderballenpressen sind jedoch Stapeldichten von 250 kg/m^3 realisierbar. Vergleicht man diese Werte mit denen von Waldhackgut ergeben sich ähnliche Größenordnungen, wobei ein Trockensubstanzgehalt von 45 – 65 Ma.-% dem von 86 Ma.-% bei Stroh gegenüber steht.

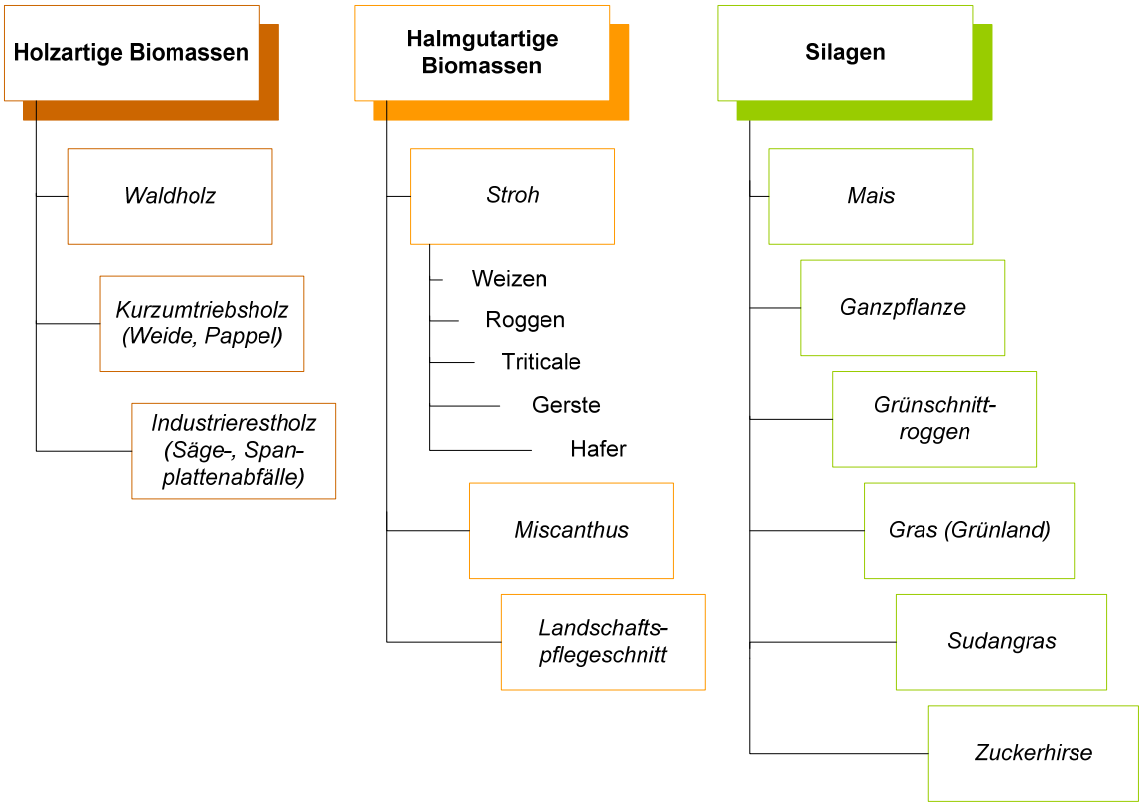


Abbildung 3-1: Rangfolge der Wichtigkeit von Biomassearten für die zukünftige energetische Nutzung nach Vetter /Vetter 2007/

Bei Kurzumtriebsholz wird für die Untersuchungen die Verwendung von Pappel aus 3- bis 5-jährigem Umtrieb (Stärke der Triebe: 8-10 cm) für die Untersuchungen empfohlen. Die Realisierung von Kurzumtriebsplantagen ist bei Schaffung eines wirtschaftlichen Anreizes (langfristige Verträge) möglich. Die Standortauswahl ist nach dem Gesichtspunkt der Konkurrenzfähigkeit zu anderen Anbaubiomassen zu betrachten (z. B. Welche Standorte weisen Vorteile für den Anbau holzartiger Biomasse oder halmgutartiger Biomasse auf?). Dabei spielen Standortansprüche, Erträge und Preise eine wichtige Rolle. Standorte mit schlechter Bodenzahl scheinen bei ausreichend guter Bewässerung (z. B. Grundwasserstand) wahrscheinlicher. Bezüglich der Erträge für Kurzumtriebsholz existieren in Deutschland nur wenige Ergebnisse. Die Zahlenwerte liegen um die 8 t TS/ha.

Für den Einsatz von Ganzpflanzensilage (GPS) in Anlagen zur thermochemischen Konversion ist aufgrund des relativ hohen Wassergehaltes eine Trocknung des Einsatzstoffes vorzusehen. Eine ökonomisch und energetisch günstige Prozessführung ist dabei lediglich beim Einsatz vorhandener Niedertemperaturwärme gegeben. GPS aus

Triticale besitzt einen TS-Gehalt von ca. 40 Ma.-% und bringt somit den höchsten Biomasseertrag. Der TS-Gehalt der GPS ist kaum von der Getreideart sondern vielmehr vom Erntezeitpunkt abhängig. Die Ernte von GPS erfolgt 10-15 Tage vor dem Drusch.

Die energetische Nutzung von Landschaftspflegematerial wird politisch angestrebt, da es in größeren Mengen und deutschlandweit anfällt. Derzeit noch für die Kompostierung verwendet, ergeben sich zunehmend Probleme durch die Anreicherung von Störstoffen wie z. B. Schwermetallen, die eine Kompostierung mit anschließender Nutzung erschweren bzw. ausschließen. Somit wird anstelle einer Verwertung eine Entsorgung, die mit entsprechenden Kosten verbunden ist, notwendig. Die energetische Nutzung stellt daher eine interessante Option für die Verwertung von Landschaftspflegematerial dar. Nachteilig für eine energetische Nutzung könnte sich die stark schwankende und standortabhängige Zusammensetzung auswirken.

Landwirtschaftliche Biomassen (Stroh/Silage) sind i. d. R. lagerfähig und damit ganzjährig auch für Großanlagen verfügbar. Eine kontinuierliche Brennstoffversorgung mit kalkulierbaren Eigenschaften, die innerhalb vorgegebener Toleranzen variieren können, ist über eine zu optimierende Zwischenlagerung möglich. Bis zum Zwischenlager ist der Transport ausschließlich über landwirtschaftliche Maschinen realisierbar.

3.1.2 Ausgewählte Biomassen

Im Rahmen des Projektes wurden 15 verschiedene Biomassen (entspricht 19 Proben) und 5 Biomassekomponenten (entspricht 7 Proben) untersucht, deren Auswahl auf Basis der in Kapitel 3.1.1 beschriebenen Erkenntnisse getroffen wurde. Die insgesamt 25 Proben decken ein breites Einsatzstoffspektrum von holzartigen über halmgutartige Biomassen bis hin zu den einzelnen Stoffgruppen (Lignin, Hemicellulose, Cellulose) ab. Die Rohstoffe standen in verschiedenen Darreichungsformen zur Verfügung. Eine Zusammenstellung der untersuchten Proben ist Tabelle 3-1 bis Tabelle 3-3 zu entnehmen.

Tabelle 3-1: Übersicht zu den im Rahmen des Projektes verwendeten holzartigen Biomassen

Rohstoff	IEC.-Nr.	Darreichungsform	Beschaffungsdatum	Herkunft / Hersteller
Sägerestholz (Fichte, rindenfrei)	2276	Pellet	02.02.2007	Fa. PTG Flurstedt, Apolda
Sägerestholz (Fichte, rindenfrei)	2478	Pellet	19.05.2008	Fa. PTG Flurstedt, Apolda
Waldrestholz mit Rinde	2472	Hackgut	Altbestand	unbekannt
Sägerestholz (Buche, rindenfrei)	2309	Späne	21.05.2007	Fa. Pollmeier, Kreuzburg
Industrierestholz (Spanplatte)	2277	Pellet	02.02.2007	Fa. PTG Flurstedt, Apolda
Kurzumtriebsholz (Pappel)	2469	Stammholz	13.02.2008	Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft (KUP Krummenhennersdorf, Kreis Mittelsachsen)

Tabelle 3-2: Übersicht zu den im Rahmen des Projektes verwendeten halmgutartigen Biomassen

Rohstoff	IEC.-Nr.	Darreichungs-form	Beschaffungs-datum	Herkunft / Hersteller
Weizenstroh	2184	Halmgut	04.09.2006	Fa. PTG Flurstedt, Apolda
Weizenstroh	2275	Pellet	02.02.2007	Fa. PTG Flurstedt, Apolda
Weizenstroh	2296	Pellet	22.03.2007	Fa. PTG Flurstedt, Apolda
Weizenstroh, grau	2279	Halmgut	04.09.2006	Fa. PTG Flurstedt, Apolda
Weizenstroh, grau	2297	Pellet	22.03.2007	Fa. PTG Flurstedt, Apolda
Rapsstroh	2386	Halmgut	06.09.2007	Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Dornburg
Landschaftspflegeheu	2480	Brikett	19.05.2008	Fa. PTG Flurstedt, Apolda
Triticale-Ganzpflanze	2471	Pellet	19.05.2008	Fa. PTG Flurstedt, Apolda
Maissilage	2475	Pellet	19.05.2008	CUTEC-Institut, Clausthal
Maissilage	2364	Pellet	09.08.2007	CUTEC-Institut, Clausthal
Roggen-Ganzpflanzensilage	2473	Pellet	19.05.2008	CUTEC-Institut, Clausthal
Grünschnittroggensilage	2474	Pellet	19.05.2008	CUTEC-Institut, Clausthal
Gerste-Ganzpflanzensilage	2366	Pellet	09.08.2007	CUTEC-Institut, Clausthal
Grassilage	2365	Pellet	09.08.2007	CUTEC-Institut, Clausthal

Tabelle 3-3: Übersicht zu den im Rahmen des Projektes verwendeten Biopolymeren

Rohstoff	IEC.-Nr.	Darreichungs-form	Beschaffungs-datum	Herkunft / Hersteller
Cellulose	2625	Pulver	02/2009	Sigma Aldrich
Fichte-Sulfitzellstoff	2621	Platte (gepresst)	06/2009	Papiertechnische Stiftung, Heidenau
Xylan	1234	Pulver	06/2009	Senn Chemicals
Xylan (aus Birkenholz)	2664	Pulver	06/2009	Sigma Aldrich
Alkali-Lignin	2623	Pulver	02/2009	Sigma Aldrich
Alkali-Lignin	2665	Pulver	06/2009	Sigma Aldrich
Organosolv-Lignin	2624	Pulver	02/2009	Sigma Aldrich

Die Fa. PTG Flurstedt aus Apolda ist bereits langjähriger Partner der TLL und wurde daher als Lieferant für die biogenen Brennstoffe ausgewählt. Das Clausthaler Umwelttechnikinstitut (CUTEC) stellte für die Untersuchungen verschiedene Restmengen an Silagepellets bereit, die im Rahmen des Verbundvorhabens „BioLog“ hergestellt wurden.

Lignin ist in kommerzieller Form aus den verschiedenen Aufschlussprozessen der Papierherstellung verfügbar. Für dieses Projekt wurden Ligninproben ausgewählt, die bei den am häufigsten technisch eingesetzten Zellstoffaufschlussverfahren, dem Sulfat- bzw. Kraftaufschluss (Alkali-Lignin) und dem Organosolv-Verfahren, anfallen. Bei der Cellulose wurde zum einen auf die häufig für Pyrolyseuntersuchungen verwendete mikrokristalline Cellulose sowie als prozessnahe Probe auf einen Fichte-Sulfitzellstoff zurückgegriffen. Als Vertreter der Hemicellulosen kam das kommerziell erhältliche Xylan zum Einsatz, das insbesondere bei Laubhölzern die dominierende Komponente innerhalb dieser Stoffgruppe darstellt.

Die gezielte Gewinnung ausreichender Mengen der Biopolymere Cellulose, Hemicellulose und Lignin aus den jeweiligen verwendeten Biomassen wurde infolge der zeit- und materialaufwendigen Abtrennung im Labormaßstab nicht weiter verfolgt.

3.1.3 Vorgehensweise bei der brennstofftechnischen Charakterisierung

Alle 25 Biomasseproben wurden einer umfangreichen brennstofftechnischen Analyse unterzogen, die die Bestimmung folgender Kenngrößen nach den gültigen Standards beinhaltete:

I Immediatanalyse

a. Wassergehalt:	DIN 51 718
b. Aschegehalt:	DIN 51 719 (nach Veraschung bei 550 °C)
c. Gehalt an flüchtigen Bestandteilen:	DIN 51 720
d. Gehalt an fixem Kohlenstoff:	Differenzbildung zu 100 %

II Elementaranalyse

a. Gehalt an Kohlenstoff, Wasserstoff:	DIN 51 721
b. Gehalt an Stickstoff:	DIN 51 722
c. Gehalt an Schwefel:	DIN 51 724
d. Gehalt an Sauerstoff:	Differenzbildung zu 100 %
e. Gehalt an Chlor:	DIN CEN TS 15 289

III Bestimmung des Brennwertes und rechnerische Ermittlung des Heizwertes

a. Brennwert, Heizwert:	DIN 51 900

IV Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) - Ascheanalyse

a. Oxidanalyse:	DIN 51 729-10 (nach Veraschung bei 550 °C)

Die Probenvorbereitung für die brennstofftechnische Analyse erfolgte nach den gültigen Standards (DIN 51701-3).

Mit den Ergebnissen der Brennstoffcharakterisierung ist die analytische Grundlage für alle folgenden Verarbeitungsschritte als auch die Bezugsgrößen für alle weiteren Untersuchungen gegeben. Um festzustellen, ob die im Rahmen des Projektes analysierten Biomassen hinsichtlich ihrer Zusammensetzung deutschlandtypische Werte liefern, wurden die Daten zum Abgleich mit bestehenden Datenbanken an die TLL weitergereicht (s. Tab Anhang A-2). Dabei ergaben sich gute Übereinstimmungen der Ergebnisse, so dass von repräsentativen Proben ausgegangen werden kann.

3.1.4 Ergebnisse der brennstofftechnischen Charakterisierung

Die Ergebnisse der Immediat- und Elementaranalyse sowie der Bestimmung von Brenn- und Heizwert sind in Tabelle 3-4 für die holzartigen Biomassen und die Biopolymere und in Tabelle 3-5 für die landwirtschaftlichen Biomassen zusammengefasst.

Die untersuchten Proben weisen biomassetypische Zusammensetzungen auf, die auch in der Literatur /FNR2005/ bestätigt werden, d. h.

- hohe Flüchtigengehalte: 72…86 Ma.-% (wf),
- niedrige Kohlenstoffgehalte: 45…51 Ma.-% (wf),
- Wasserstoffgehalte: um 6 Ma.-% (wf),
- hohe Sauerstoffgehalte: 38…43 Ma.-% (wf),
- niedrige Heizwerte: 17…19 MJ/kg (wf) und
- sehr niedrige Schwefelgehalte.

Zwischen holz- und halmgutartigen Biomassen ergeben sich die typischen Unterschiede.

Die Zusammensetzungen für die drei Sägerestholzchargen (2x Fichte; 1x Buche) weichen nur geringfügig voneinander ab. Das Pappelholz und das Waldrestholz weisen infolge des Rindenanteils höhere Asche- und höhere Kaliumgehalte gegenüber Sägerest- und Industrierestholz auf. Dabei besitzt Pappelholz den höchsten Kaliumanteil, was auch auf die kürzere Wachstumsperiode zurückzuführen ist, da Kalium als Pflanzennährstoff dient. Generell liegen die Aschegehalte für Holz im Bereich unter 1 Ma.-% (wf), jedoch bewirken steigende Rindenanteile eine Zunahme. Chlor ist bei den Hölzern nur in marginalen Mengen vorhanden. Der Stickstoffgehalt ist mit Ausnahme des Industrierestholzes aus der Spannplattenherstellung (Verwendung von Formaldehydharzen als Leim) gering. Waldrestholz zeigt mit ca. 78 Ma.-% (wf) einen geringeren Anteil flüchtiger Bestandteile, was für Holz eher untypisch ist (sonst um 85 Ma.-% wf). Die Heizwerte liegen mit > 18 MJ/kg (wf) in der üblichen Größenordnung für Holz und somit etwas über denen der Halmgüter (um 17 MJ/kg wf).

Die halmgutartigen Biomassen weisen im Vergleich zu den Hölzern höhere Aschegehalte (4…10 Ma.-% wf) auf. Dies liegt daran, dass Holz die mineralischen Komponenten überwiegend in der Rinde einlagert (Aschegehalte Rinde: 8 bis 12 Ma.-%) und der Eintrag von Fremdasche bei Ernte, Aufbereitung und Lagerung im Vergleich zu den landwirtschaftlichen Biomassen deutlich geringer ist. Zudem enthalten die Halmgüter infolge der kürzeren Wachstumsperiode höhere Nährstoffgehalte. Die Relevanz der Ascheanteile im Einsatzstoff ergibt sich bei der thermochemischen Konversion zum einen daraus, dass die nach dem Prozess anfallende Asche entsorgt oder verwertet werden muss und zum anderen durch die verfügbare Menge an katalytisch wirksamen Substanzen bei der pyrolytischen Zersetzung. Die Zusammensetzung der Asche spielt dabei ebenfalls eine bedeutende Rolle. Die in der Asche enthaltenen Elemente sind weiterhin interessant für das Erweichungs- und Schmelzverhalten in den Konversionsanlagen. Die Verflüchtigung mineralischer Bestandteile kann zu Anbackungs- und Korrosionserscheinungen führen.

Der Gehalt an flüchtigen Bestandteilen liegt bei den landwirtschaftlichen Biomassen verglichen mit Holz niedriger (i. d. R. 73 bis 76 Ma.-% wf). Dies führt bei der Pyrolyse

dazu, dass der Gehalt an kondensierbaren Produkten abnimmt. Ausnahmen bilden Triticale-GP und Maissilage mit Werten um 80 Ma.-% (wf). Die landwirtschaftlichen Biomassen zeigen Kohlenstoffgehalte zwischen 45 und 47 Ma.-% (wf) und liegen somit unterhalb der Werte für Holz (ca. 50 Ma.-% wf), was im höheren Ascheanteil begründet ist. Eine Ausnahme bildet die ältere Charge der Maissilage, die mit 57 ggü. 46 Ma.-% (wf) einen deutlich höheren Kohlenstoffgehalt aufweist, der vermutlich auf einen anderen Abbaugrad während der Silierung zurückzuführen ist. Weizenstroh enthält tendenziell etwas weniger Sauerstoff als die Silagen.

Die drei Weizenstrohchargen sind in ihrer Zusammensetzung vergleichbar, lediglich beim Stickstoff-, Kalium- und Aschegehalt gibt es gewisse Abweichungen. Da gerade bei diesen Elementen bzw. Elementgruppen eine starke Beeinflussung z. B. durch klimatische Bedingungen, Standort, ackerbaulich Praxis und Düngung gegeben ist, sind diese nicht untypisch. Das graue Weizenstroh ist durch längere Feldliegezeiten gekennzeichnet, was zu einer Auswaschung von wasserlöslichen Elementen führt. Eine deutliche Reduzierung der Anteile ergibt sich bei Kalium (40…55 %) und Chlor (40…60 %). Das Rapsstroh weist mit ca. 0,54 Ma.-% (wf) den höchsten Chlorgehalt auf, gefolgt von Grassilage und Roggen-GP-Silage. Hierbei stellt die Düngung eine wesentliche Einflussgröße dar, da Chlorid ein Begleitstoff der Kaliumdüngung ist. Generell liegen die Chlorgehalte bei den Silagen (Ausnahme: Mais) vergleichsweise hoch, was auf die noch vorhandene physiologische Aktivität der Pflanze beim Erntezeitpunkt zurückzuführen ist. Halmgutartige Biomassen enthalten weiterhin hohe Anteile an Kalium, das in der Pflanze für den Wasserhaushalt (Aufrechterhaltung des osmotischen Drucks der Zellen) zuständig ist und viele Enzymreaktionen katalysiert. Insbesondere die Strohsorten und die Ganzpflanzensilagen weisen mit Werten zwischen 1,5 und 2,5 Ma.-% (wf) sehr hohe Kaliummengen auf.

Stickstoffgehalte ergeben sich für Stroh und Triticale-GP in der Größenordnung von 0,6 bis 1 Ma.-% (wf). Die höheren Stickstoffgehalte der Silagen (bis 2,2 Ma.-% wf) und des Landschaftspflegeheus sind mit dem unterschiedlichen Reifezuständen während des Erntezeitpunktes zu erklären. Die Pflanze lagert in der Wachstumsphase den Stickstoff in der Frucht (Mais, Gerste) oder im Halm (Gras) in Form von Proteinen ein. Außerdem ist er auch im Chlorophyll (Blattgrün) enthalten. Beim Grasschnitt bzw. bei der Ernte von Ganzpflanzen für die Silageherstellung besitzen die Pflanzen noch eine hohe physiologische Aktivität (sog. Milchreife bei Getreide), somit ist viel Stickstoff in der Pflanze eingelagert. Wird erst zur Vollreife geerntet (Bsp. Weizenstroh), ist der Stickstoffgehalt bereits wieder gefallen. Generell ist festzustellen, dass insbesondere die Silagen innerhalb der landwirtschaftlichen Biomassen hohe Anteile an den Elementen Stickstoff, Chlor und Kalium aufweisen, die bei der thermochemischen Konversion verschiedene Probleme mit sich bringen.

Aufgrund der sehr geringen Schwefelgehalte der Biomassen wird im Weiteren die Bilanzierung mit Sauerstoff zusammen durchgeführt, da bei getrennter Betrachtung infolge der geringen Schwefelmengen und der Bestimmungsgenauigkeit der Analysenmethoden der Fehler in der Schwefelbilanz dementsprechend hoch ausfällt.

Tabelle 3-4: Ergebnisse der allgemeinen brennstofftechnischen Untersuchungen für die holzartigen Biomassen und die Biopolymere

Biomasse *Angaben in Ma.-%*	Sägerestholz (rindenfrei)		Wald-restholz mit Rinde	Sägerest-holz (Buche, rindenfrei)	Industrie-restholz (Span-platte)	Pappel (KUP)	Cellu-lose	Fichte-Sulfit-zellstoff	Xylan	Xylan (aus Birken-holz)	Alkali-Lignin		Organo-solv-Lignin
Probenbezeichnung IEC	2276	2478	2472	2309	2277	2469	2625	2621	-	2664	2623	2665	2624
Immediatanalyse in Ma-%													
- Wasser (an)	6,10	3,40	6,66	11,93	6,71	3,44	4,15	3,33	n. b.	6,90	9,25	9,00	3,00
- Wasser (roh)	n. b.	6,94	12,53	n. b.	n. b.	9,70	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
- Asche (wf)	0,33	0,48	1,45	0,57	1,01	1,52	0,00	0,81	n. b.	8,35	18,37	17,65	0,07
- Flüchtige (wf)	85,65	84,95	78,54	84,14	80,63	83,30	94,84	91,55	n. b.	74,54	45,49	45,30	72,44
- Fixer Kohlenstoff (wf)	14,01	14,58	20,01	15,29	18,36	15,18	5,16	7,64	n. b.	17,11	36,14	37,05	27,48
Summe	*100,00*	*100,00*	*100,00*	*100,00*	*100,00*	*100,00*	*100,00*	*100,00*	-	*100,00*	*100,00*	*100,00*	*100,00*
Elementaranalyse in Ma-% (waf)													
- Kohlenstoff	50,82	51,10	52,06	49,96	49,54	50,55	45,39	46,34	n. b.	47,21	63,53	65,31	66,86
- Wasserstoff	6,13	6,16	5,92	6,11	6,14	6,00	6,11	6,08	n. b.	5,96	5,51	5,38	5,83
- Stickstoff	0,24	0,22	0,25	0,22	4,09	0,56	0,09	0,18	n. b.	0,05	0,15	0,12	0,11
- Schwefel, verbrennlich	0,11	0,08	0,00	0,15	0,13	0,00	0,21	0,38	n. b.	0,23	4,53	5,60	0,21
- Sauerstoff	42,71	42,44	41,77	43,56	40,10	42,89	48,19	47,02	n. b.	46,54	26,28	23,59	26,99
- Sauerstoff + Schwefel	42,81	42,52	41,77	43,71	40,23	42,89	48,40	47,40	n. b.	46,78	30,82	23,59	27,19
Summe	*100,00*	*100,00*	*100,00*	*100,00*	*100,00*	*100,00*	*100,00*	*100,00*	-	*100,00*	*100,00*	*100,00*	*100,00*
- Chlor (wf) [a]	n. b.	0,007	0,021	n. b.	n. b.	0,006	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
- Chlor (wf) [b]	0,000	0,002	0,001	0,001	0,005	0,001	n. b.	0,007	n. b.	n. b.	0,022	n. b.	n. b.
- Kalium (wf) [b]	0,036	0,050	0,134	0,130	0,100	0,255	n. b.	n.n.	n. b.	n. b.	0,176	n. b.	n. b.
- Natrium (wf) [b]	n.n.	0,003	0,003	0,007	0,024	0,003	n. b.	0,007	n. b.	n. b.	11,900	n. b.	n. b.
Heizwert/Brennwert in kJ/kg (wf)													
- H_O	19.711	20.161	20.154	19.302	19.861	19.503	17.400	17.875	n. b.	16.523	21.837	21.856	28.040
- H_U	18.378	18.825	18.881	17.977	18.534	18.212	16.066	16.560	n. b.	15.330	20.856	20.890	26.770

n.n. ... nicht nachweisbar; n.b. ... nicht bestimmbar

[a] Bestimmung gemäß DIN CEN TS 15289

[b] Berechnung auf Basis der Werte der RFA-Analyse

Tabelle 3-5: Ergebnisse der allgemeinen brennstofftechnischen Untersuchungen für die landwirtschaftlichen Biomassen

Biomasse *Angaben in Ma.-%*	Weizenstroh			Weizenstroh, grau		Raps-stroh	Land-schafts-pflege-heu	Triticale-GP	Maissilage		Roggen-GPS	Grün-schnitt-roggen-silage	Gerste-GPS	Gras-silage
Probenbezeichnung IEC	2184	2275	2296	2279	2297	2386	2480	2471	2475	2364	2473	2474	2366	2365
Immediatanalyse in Ma-%														
- Wasser (an)	5,35	6,81	8,20	7,26	7,66	3,21	5,85	6,93	5,79	5,85	5,48	4,72	4,93	4,52
- Wasser (roh)	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	11,88	13,05	13,07	n.b.	7,94	6,51	n.b.	n.b.
- Asche (wf)	6,59	8,16	8,71	6,63	6,79	7,86	8,99	4,50	4,16	5,09	8,00	8,92	8,18	6,73
- Flüchtige (wf)	74,83	73,17	72,29	74,52	76,28	75,60	73,87	80,17	80,90	78,97	75,91	75,21	75,28	75,42
- Fixer Kohlenstoff (wf)	18,57	18,67	19,00	18,85	16,93	16,54	17,14	15,33	14,93	15,94	16,09	15,87	16,54	17,85
Summe	*100,00*	*100,00*	*100,00*	*100,00*	*100,00*	*100,00*	*100,00*	*100,00*	*100,00*	*100,00*	*100,00*	*100,00*	*100,00*	*100,00*
Elementaranalyse in Ma-% (waf)														
- Kohlenstoff	49,67	49,62	49,38	50,54	50,02	49,59	50,26	48,37	48,32	60,41	49,87	49,70	50,04	50,20
- Wasserstoff	6,45	6,06	6,11	6,05	6,18	5,91	6,30	6,26	6,38	6,30	6,46	6,43	6,24	6,05
- Stickstoff	0,83	0,69	0,86	0,77	1,01	1,15	1,83	1,08	1,12	1,48	2,41	1,68	1,90	1,47
- Schwefel, verbrennlich	0,20	0,14	0,17	0,17	0,26	0,20	0,13	0,12	0,11	0,16	0,20	0,16	0,14	0,15
- Sauerstoff	42,86	43,49	43,48	42,46	42,54	43,15	41,48	44,17	44,07	31,66	41,05	42,03	41,68	42,13
- Sauerstoff + Schwefel	43,06	43,63	43,65	42,64	42,79	43,35	41,60	44,30	44,18	31,82	41,25	42,19	41,81	42,28
Summe	*100,00*	*100,00*	*100,00*	*100,00*	*100,00*	*100,00*	*100,00*	*100,00*	*100,00*	*100,00*	*100,00*	*100,00*	*100,00*	*100,00*
- Chlor (wf) [a]	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	0,719	0,236	0,034	0,070	0,170	0,476	0,352	0,421	0,974
- Chlor (wf) [b]	0,110	0,164	0,154	0,099	0,063	0,543	0,160	0,015	0,032	0,127	0,426	0,250	0,319	0,519
- Kalium (wf) [b]	1,460	1,753	1,888	0,881	0,857	1,738	1,227	0,615	0,699	1,123	2,024	1,249	1,955	1,228
- Natrium (wf) [b]	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0,128	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0,065	n.n.	0,083	0,235
Heizwert/Brennwert in kJ/kg (wf)														
- H_O	18.309	17.939	17.976	18.575	18.541	17.808	18.218	18.257	18.559	18.762	18.818	18.334	18.605	18.540
- H_U	16.995	16.724	16.759	17.342	17.284	16.620	16.966	16.954	17.225	17.457	17.521	17.057	17.355	17.309

n.n. ... nicht nachweisbar; n.b. ... nicht bestimmbar

Bei den Biopolymeren weisen Cellulose bzw. der Zellstoff mit > 90 Ma.-% (wf) den höchsten Anteil an flüchtigen Bestandteilen auf, gefolgt von Xylan mit 75 Ma.-% (wf) und Lignin. Das Lignin aus dem Sulfataufschluss ist durch einen extrem hohen Aschegehalt (um 24 Ma.-% wf) gekennzeichnet, der überwiegend aus Resten der Aufschlusschemikalien resultiert. Lignin weist verglichen mit den Biomassen, der Cellulose und dem Xylan (Hemicellulose) mehr Kohlenstoff, deutlich weniger Sauerstoff und damit einhergehend auch höhere Heizwerte auf. Ursachen dafür sind in der Struktur der Biomassestoffgruppen zu finden. Während Cellulose und Hemicellulose aus linearen bzw. verzweigten Ketten von Glucose- bzw. Xylosemolekülen aufgebaut sind, besitzt das Lignin einen Phenolring mit Phenylpropaneinheit als Grundbaustein und hat somit eher aromatischen Charakter.

Neben Kalium und Chlor beinhalten Biomassen weitere mineralische Komponenten, die je nach Biomasseart, Wachstumsort/-bedingungen und Vorbehandlung (z. B. Waschen) in unterschiedlichen Konzentrationen vorkommen. Die Zusammensetzung der Aschebildner spielt bei der Pyrolyse von Biomassen aus folgenden Gründen eine Rolle:

- Elemente wie Alkalien (K, Na), Erdalkalien (Ca, Mg) oder Eisen sind in der Lage die *ablaufenden Reaktionsmechanismen bei der Pyrolyse zu beeinflussen (katalytische Wirkung)*. So begünstigt z. B. Kalium die primären Koksbildungsreaktionen, was wiederum zu einer Verringerung der Flüssigproduktausbeute führt. Auch auf sekundäre Reaktionen zwischen Koks und Gasphase z. B. heterogene Wassergas- und Boudouardreaktion besitzen verschiedene Elemente eine katalytische Wirksamkeit (z. B. K, Ca, Fe).
- Abhängig von den gewählten Prozessbedingungen können in der Biomasse enthaltene *anorganische Elemente in die Gasphase übergehen*. Die Entbindung von z. B. Chlor in Form von HCl kann im weiteren Prozessverlauf bei unterschreiten des Säuretaupunktes im Gasweg zu Korrosion an Werkstoffen führen. Mit einer Verflüchtigung von Alkalien ist infolge der geringeren Temperaturen (bis 800 °C) im Gegensatz zu Verbrennungs- und Vergasungsreaktionen nur in geringerem Ausmaß zu rechnen.
- Infolge der mit steigender Temperatur fortschreitenden Entgasung kommt es zu einer *Anreicherung verschiedener Elemente im festen, kohlenstoffhaltigen Rückstand (Koks)*, wodurch die Eigenschaften des Kokses für die weitere Verwendung maßgeblich beeinflusst werden.
- Aschebildner können weiterhin auch bei der *Ausbildung der Porenstruktur* eine Rolle spielen, die die Reaktionsfähigkeit in weiteren Umwandlungsprozessen bzw. das Adsorptionsverhalten (Aktivkokseinsatz) der Kokse beeinflusst.

Die Ergebnisse der mittels Röntgenfluoreszenzanalyse bestimmten Elementgehalte in den Aschen der einzelnen Rohstoffe sind in Tab Anhang A-3 für Holz und die Biopolymere sowie in Tab Anhang A-4 für die landwirtschaftlichen Biomassen zusammengefasst.

Die landwirtschaftlichen Biomassen weisen gegenüber den Hölzern nur sehr geringe Anteile an Spurenkomponenten (s. methodenspezifische Orientierungswerte in Tab Anhang A-3 und Tab Anhang A-4) auf. Dabei dominieren in den holzartigen Bio-

massen die Elemente Mangan und Zink, die als Pflanzennährstoffe eine Rolle spielen und zahlreiche Enzymreaktionen der Pflanze als Katalysator beeinflussen (Mangan) bzw. am Stoffwechsel beteiligt sind (Zink).

Bei den Biopolymeren konnte infolge der geringen verfügbaren Mengen nicht von allen Proben eine Bestimmung der Aschezusammensetzung erfolgen. Das aus dem Kraft-Aufschluss stammende Lignin weist mit 10 Ma.-% (wf) einen hohen Aschegehalt auf, wobei diese zu einem hohen Maß aus Natrium und Schwefel besteht. Dies hängt damit zusammen, dass das verwendete Lignin aus der Aufschlusslauge abgetrennt wird und somit noch entsprechende Reste der alkalischen Aufschlusschemikalie bestehend aus Natriumhydroxid (NaOH), Natriumsulfid (Na_2S) und Natriumsulfat (Na_2SO_4) enthalten sind.

3.1.5 Stoffgruppenzusammensetzung der Biomassen

Biomassen setzten sich strukturell gesehen aus den Stoffgruppen Lignin, Cellulose und Hemicellulose zusammen. Weiterhin sind noch anorganische (Asche) und organische Nebenbestandteile enthalten. Diese sogenannten Extraktstoffe stellen ein breites Spektrum aus verschiedenen Stoffen wie Fetten, Fettsäuren, Wachsen, Harzen, Monosacchariden, Stärke, Proteinen, Pektinen, Terpenen und ätherischen Ölen dar /Evans1986/, /Fengel2003/. Pektine werden häufig auch zur Gruppe der Hemicellulosen gezählt, da sie, ähnlich wie diese, Uronsäuren als Grundbausteine besitzen. Pektine weisen dabei jedoch eine sehr geordnete Struktur aus hauptsächlich Galacturonsäuremolekülen auf, die sich über β-1,4-glycosidische Bindungen zu Ketten verknüpfen, welche wiederum über die Bildung von Carboxylaten (Einbindung von Ca^+ an die Säuregruppe COO^-) untereinander vernetzt sind. Pektine fungieren in den Pflanzen ähnlich wie die Hemicellulosen als Kitt- und Gerüstsubstanz in den Zellwänden und sind wie Lignin, Cellulose und Hemicellulose an deren Aufbau beteiligt. Letzteres trifft für die organischen Nebenbestandteile nicht zu. Sie sind hingegen in speziellen Geweben eingelagert /Kai1991/, /Pettersen1984/.

Cellulose ist in allen Pflanzen als Hauptbestandteil der Zellwände zu finden und weist eine geordnete Struktur auf. Sie ist ein kettenförmig aufgebautes Polysaccharid, dessen Grundstruktur das Disaccharid Cellobiose darstellt. Diese setzt sich wiederum aus zwei β-D-Glucopyranosemolekülen zusammen, welche über β-1-4-glycosidische Bindungen miteinander verknüpft sind. Der Zusammenschluss der Monomere zum Polysaccharid Cellulose erfolgt durch Wasserabspaltung. Der durchschnittliche Polymerisationsgrad (DP; Kettenlänge) der Cellulose variiert zwischen den verschiedenen Pflanzenarten. Holz weist einen DP von 5.000 bis 10.000 auf /Mohan2006/, /Rowell2005/. Über Wasserstoffbrückenbindungen der freien Hydroxylreste kommt es zur Verknüpfung benachbarter β-D-Glucopyranoseringe miteinander und somit zu einer Verdrehung. Dies bewirkt eine Stabilisation der Kettenstruktur /Mohan2006/, /Rowell2005/.

Hemicellulose gehört wie die Cellulose zur Gruppe der Polysaccharide und ist Bestandteil der Zellwände sowie als Reservestoff in Früchten, Samen und Knollen eingelagert. Sie wirkt zumeist als Kittsubstanz zwischen Lignin und der Cellulose. Ihr Aufbau ist verglichen mit der Cellulose jedoch viel komplexer. Die Grundbestandteile der Hemicellulosen sind Pentosen $(C_5H_8O_4)_n$ (Xylose, Arabinose), Hexosen $(C_6H_{10}O_5)_n$ (Glucose, Galactose, Mannose) und Uronsäuren (Gluco-, Methylgluco-, Galacturonsäure).

Im Gegensatz zur Cellulose bilden sich hier verzweigte Moleküle mit einem wesentlich geringeren Polymerisationsgrad (100 bis 200) aus. Infolge der Verzweigungen und des amorphen Aufbaus ist die Hemicellulose reaktiver als die Cellulose.

Lignin ist ein dreidimensionales aromatisches Polymer, welches aus monomeren Grundbausteinen aufgebaut ist. Die Grundbausteine des Lignins bestehen aus einem phenolischen Ring an dem sich eine Propanseitenkette und Hydroxyl- (OH-) sowie Methoxyl- (-OCH_3)gruppen befinden (sog. Phenylpropaneinheit). Die Monomere sind Hydroxyphenyl- (H-Baustein), Guaiacyl- (G-Baustein) und Syringylalkohol (S-Baustein) /Bayerbach2006/, /Pettersen1984/. Das aus den Grundbausteinen zusammengesetzte Lignin entsteht über enzymatische Polymerisation der Alkohol-Einheiten /Evans1986/. In den Pflanzenzellen ist das Lignin für die Steifigkeit und Druckfestigkeit der Zellen verantwortlich. Die Ligninstruktur weist in Abhängigkeit von der Pflanzenart einige Unterschiede auf. Nadelholzlignin besteht überwiegend aus der Grundeinheit Guaiacylakohol (sog. G-Lingin), während bei Laubhölzern Syringyl- und Guaiacylakohol (sog. G/S-Lignin) dominieren. Bei Einjahrespflanzen können alle drei Bausteine vorkommen. /Bayerbach2006/, /Mohan2006/, /Evans1986/.

Für die Bestimmung der einzelnen Stoffgruppen existieren in der Literatur verschiedene Verfahren, jedoch sind davon nur wenige standardisiert und dann zumeist auf Holz als Einsatzstoff angepasst (z. B. Klason-Lignin nach TAPPI 222 om-98). Daher wurde zunächst eine ausführliche Recherche zu möglichen Bestimmungsmethoden vorgenommen, deren Anwend- und Handhabbarkeit überprüft und schließlich eine Auswahl an Methoden getroffen, die in Testversuchen angepasst werden konnten. Aufgrund der aufwendigen Verfahren war es jedoch nicht möglich alle für die Pyrolyseuntersuchungen eingesetzten Biomassen hinsichtlich ihrer Stoffgruppenzusammensetzung zu charakterisieren. Die im vorliegenden Bericht erzielten Ergebnisse zur Stoffgruppenzusammensetzung (s. Tabelle 3-6) basieren, wenn nicht anders angegeben, auf den in Anhang A (Tab Anhang A-5) beschriebenen Verfahren.

Tabelle 3-6: Ergebnisse der Stoffgruppenbestimmung für verschiedene Biomassen

Angaben in Ma.-% (wf)	Roggen-ganz-pflanzen-silage	Land-schafts-pflege-heu	Sägerest-holz (Fichte, rindenfrei)	Mais-silage	Weizen-stroh	Waldrest-holz (Fichte mit Rinde)	Waldrest-holz (Fichte mit Rinde)
	2473	2480	2478	2475	2296	2472	2472
Asche	8,0	9,0	0,5	4,2	8,7	1,5	1,5
Extraktstoffe	19,3	8,3	5,6	21,1[c]	12,6[c]	12,5[c]	5,2
Lignin	12,5	22,0	28,6	13,0	29,6	32,4	35,6[d]
Cellulose	24,6	27,7	56,5	20,2	33,9	34,9	34,2[e]
Hemicellulose	31,4	36,5	21,1	44,9	36,4	29,7	18,6
Σ	95,8	103,5	112,3	103,4	121,2	111,0	95,1

[c] Extraktion mit Heißwasser und anschließend mit Ethanol

[d] 75%ige H_2SO_4, 48h bei RT → verbleibender Feststoff mit 0,5% HCl 12h bis zum Sieden erwärmt

[e] Holocellulose: bei 75°C in Wasser, stündlich Zugabe von 1,344g $NaClO_2$ + 8ml H_2O + 0,4 ml CH_3COOH (über 7 h); Cellulose analog Verfahren in Anhang A (Tab Anhang A-5)

Die Abweichung der Summe der einzelnen Anteile zu 100 % resultiert aus den angewendeten Bestimmungsverfahren. Zunächst wird der Gehalt an extrahierbaren Stoffen ermittelt. Die extrahierte Biomasse wird anschließend sowohl für die Bestimmung des Lignin- als auch des Holocelluloseanteils genutzt. Die Isolierungsverfahren der Stoffgruppen lassen sich dabei in zwei grundlegende Varianten einteilen: (1) Methoden bei denen Lignin herausgelöst wird (z.B. Kraft-, Klason-, Organosolv-Lignin) und (2) Methoden bei denen Cellulose und Hemicellulose aus dem Einsatzstoff extrahiert werden und Lignin als unlöslicher Rest zurückbleibt. Für die einzelnen Verfahren kommen verschiedene Lösungsmittel, Säuren oder Basen in unterschiedlichen Konzentrationen als Aufschluss- oder Extraktionsmittel zum Einsatz. Je nach angewendeter Methode kann es vorkommen, dass nicht das gesamte Zielprodukt in Lösung geht oder aber Teile der anderen Stoffgruppen mit herausgelöst werden. Daher ist es auch nicht sinnvoll, die Anteile auf 100 % hochzurechnen, da sich der Fehler dann gleichmäßig auf alle Stoffgruppen verteilen würde. Weiterhin können je nach Bestimmungsmethode strukturelle Änderungen der Stoffgruppen durch den Aufschluss auftreten (z.B. Kraft-Lignin).

Bei der Heißwasserextraktion ergeben sich sehr hohe Extraktstoffgehalte (s. Tabelle 3-6). Vergleicht man z. B. die Werte von Waldrestholz nach dieser Methode mit den Ergebnissen der Extraktion mit Ethanol/Toluol ergibt sich eine Differenz von -7,3 Ma.-% (wf). Ursachen für diese Unterschiede können zum einen das Herauslösen von Zuckern (Hemicellulosen) oder auch von mineralischen Komponenten wie Kalium und Chlor sein. Die Unterschiede im Hemicellulosegehalte bei Waldrestholz (29,7 bzw. 18,6 Ma.-% wf) resultieren aus der veränderten Bestimmung der Holocellulose (Summe der Anteile an Cellulose und Hemicellulose). Bei dem geringeren erzielten Wert wurde eine aggressivere Methode angewendet, die offensichtlich bereits ein Herauslösen von Hemicellulosebestandteilen bewirkte.

Das untersuchte Weizenstroh weist verglichen mit Literaturwerten (s. Tabelle 3-8) einen sehr hohen Ligningehalt (29,6 Ma.-% wf) auf. Hier ist zu vermuten, dass bei der Bestimmung nicht alle Bestandteile der Cellulose und Hemicellulose gelöst wurden, was u. U. auf eine ungenügende Benetzung der Biomasse mit den Aufschlusschemikalien zurückzuführen ist.

Testweise wurden auch drei Biomasseproben (2 Hölzer, 1 Weizenstroh) für eine Stoffgruppenbestimmung an das Institut für Holz- und Pflanzenchemie der Technischen Universität Dresden (Bereich Forstwissenschaften in Tharandt) vergeben. Dort wurden die Gehalte an Lignin, Extraktstoffen und Holocellulose ermittelt (s. Tabelle 3-7).

Tabelle 3-7: Stoffgruppenzusammensetzung verschiedener Biomassen

Biomasse	Sägerestholz (Fichte, rindenfrei)		Sägerestholz (Buche, rindenfrei)		Weizenstroh	
IEC Probennr.	2276		2309		2296	
Analysenwerte in Ma.-%	(wf)	(waf)	(wf)	(waf)	(wf)	(waf)
Asche	0,33	-	0,57	-	8,71	-
Lignin	28,9	29,0	22,0	22,1	22,6	24,8
Hemicellulose + Cellulose	64,5	64,7	70,5	70,9	35,0	38,3
Extrahierbare Stoffe	10,0	10,0	11,0	11,1	11,0	12,0
Summe	103,7	103,7	104,1	104,1	77,3	75,1

Die erhaltenen Ergebnisse bestätigen, dass es sich bei dem Sägerestholz um ein Nadelholz handelt, da der Ligningehalt mit ca. 29 Ma.-% in einer dafür typischen Größenordnung liegt (s. Tabelle 3-8, Werte für Fichte). Das Buchenholz weist mit 22 Ma.-% einen laubholztypischen Ligningehalt auf (s. Tabelle 3-8, Werte für Buche). Da sich der Celluloseanteil von Laub- und Nadelhölzer nicht wesentlich unterscheidet (39 bis 42 Ma.-%, s. Tabelle 3-8) ergeben sich weiterhin Differenzen im Hemicellulosegehalt, der bei Laubhölzern höher liegt.

Tabelle 3-8: Literaturwerte für die Stoffgruppenzusammensetzung von Fichtenholz, Buchenholz und Weizenstroh

Biomasse	Fichte	Buche	Weizenstroh			
Quelle	/Fengel1983/		/Raveendran1996/	/Müller-Hagedorn2007/	/Demirbas2006/	/McKendry2002/
Analysenwerte in Ma.-%	(wf)	(wf)	(wf)	(wf)	(wf)	k.A.
Asche	k.A.	k.A.	11,2	5,6	15,1	k.A.
Lignin	27 - 28	24 - 25	16,4	15,1[f]	14,9	15-20
Cellulose	40 - 42	39 - 40	30,5	39,3[f]	28,7	33-40
Hemicellulose	28 - 31	32 - 33	28,9	42,6[f]	38,7	20-25
Holocellulose	k.A.	k.A.	55,8	k.A.	k.A.	k.A.
Extrahierbare Stoffe	k.A.	k.A.	13,4	12,1[g]; 5,5[h]	2,6[i]	k.A.

Tabelle 3-9: Literaturwerte für die Stoffgruppenzusammensetzung verschiedener halmgutartiger Biomassen und von Pappel

Biomasse	Mais (Gavott)	Mais (Doge)	Maisstroh	Maisstengel	Raps	Wintertriticale	Espe/ Pappel
Quelle	/Müller-Hagedorn2007/		/Kaltschmitt 2009/	/Raveendran1995/	/Vetter1995/		/DiBlasi 2010/
Analysenwerte in Ma.-%	(wf)	(wf)	(wf)	(wf)	(wf)	(wf)	(wf)
Asche	2,2	3,1	6,0	6,8	k.A.	k.A.	1,0
Lignin	10,9	11,6	19,0	17,5	k.A.	k.A.	20,0
Cellulose	34,3	40,0	38,0	42,7	14,7	16,8	49,0
Hemicellulose	53,3	45,3	26,0	23,6	26,1	20,1	21,7
Holocellulose	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Extrahierbare Stoffe	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	5,9

Die experimentell bestimmten Extraktstoffgehalte für die beiden Hölzer liegen in der gleichen Größenordnung, wenngleich typischerweise Laubhölzer geringere Werte aufweisen. Betrachtet man Weizenstroh als Vertreter der einjährigen Pflanzen, sollte dieses aufgrund der geringeren Verholzung ggü. Fichten- und Buchenholz weniger Lignin aufweisen. Mit 24,8 Ma.-% (waf) liegt der Wert jedoch höher als bei Buchenholz und deutlich über anderen Literaturangaben für Weizenstroh (s. Tabelle 3-8). Der ermittelte Extraktstoffgehalt deckt sich ungefähr mit den Aussagen von /Raveendran1996/. Der geringe Anteil an Holocellulose und die daraus resultierende Differenz der Stoffgruppenanalyse zu 100 % (32,7 Ma.-% wf) resultiert möglicherweise daraus, dass neben

[f] Bezogen auf mit Cyclohexan/Ethanol extrahierte, getrocknete Biomasse

[g] Kaltwasserextrakt

[h] Heißwasserextrakt

[i] Extraktion mit Alkohol/Benzen

den genannten Stoffgruppen noch größere Anteile an Pektinen in der Biomasse vorkommen, die mit der angewendeten Analysenmethode nicht erfasst werden /Fischer2008/.

Zu berücksichtigen ist, dass der Vergleich mit Literaturwerten im Allgemeinen schwierig ist, da häufig keine Angaben zu den Bestimmungsverfahren gemacht werden, sich die ermittelten Gehalte aber je nach Methode u. U. deutlich unterscheiden können. Dies zeigt sich insbesondere bei den Angaben für die Extraktstoffe sowie die Hemicellulosen (s. Tabelle 3-8, Tabelle 3-9). Insbesondere für die Silagen sind in der Literatur keine Daten verfügbar.

Teilt man die untersuchten Biomassen in folgende drei Gruppen: (1) Holzartige, (2) Halmgutartige und (3) Silagen, lassen sich gewisse Charakteristika bezüglich der Anteile der Stoffgruppen finden. Nadelholz weist mit Werten zwischen 28 und 35 Ma.-% (wf) die höchsten Ligningehalte auf, gefolgt von Laubholz (20…22 Ma.-% wf) sowie Stroh/Heu (18…25 Ma.-% wf). Die niedrigsten Ligninanteile finden sich mit 12…13 Ma.-% (wf) in den Silagen. Bei Cellulose ergeben sich ebenfalls für Holz die höchsten (40…50 Ma.-% wf) und für die Silagen die niedrigsten Werte (20…25 Ma.-% wf). Stroh/Heu und vermutlich auch die Ganzpflanzen sind dazwischen einzuordnen (28…38 Ma.-% wf). Hemicellulosen dominieren den strukturellen Aufbau der Silagen und des Mais (32…53 Ma.-% wf). Die untersuchten Nadelhölzer liegen im Bereich um 21 Ma.-% (wf). Laubholz sollte i. d. R. höhere Gehalte (um 28 Ma.-% wf) aufweisen. Stroh und Heu liegen mit ihren Hemicelluloseanteilen zwischen den Hölzern und den Silagen (~36 Ma.-% wf). Für die Extraktstoffe ist eine Einschätzung schwierig, da je nach Bestimmungsverfahren wahrscheinlich bereits höhere Zuckeranteile aus der Biomasse herausgelöst wurden.

Die Einteilung der Biomassen in die drei Gruppen entspricht also einer ähnlichen Stoffgruppenzusammensetzung. Dies lässt vermuten, dass sich während der pyrolytischen Zersetzung ein ähnliches Verhalten innerhalb dieser Gruppen ergibt.

3.2 Planung, Errichtung und Inbetriebnahme der Pyrolyseanlage (AP I)

Im Rahmen des Forschungsvorhabens war eine Versuchsanlage zur Bilanzierung der Biomassepyrolyse auszulegen und zu errichten. Im Folgenden wird zunächst auf die erarbeiteten Anforderungskriterien sowie die Auswahl des Reaktorprinzips nach Bewertung des Standes der Wissenschaft eingegangen. Anschließend erfolgt die Vorstellung des realisierten Versuchsreaktors und der zusätzlich verwendeten Ausrüstung zur Untersuchung des Pyrolyseverhaltens verschiedener Biomassen.

3.2.1 Anforderungen an eine Anlage zur Bilanzierung der Biomassepyrolyse

Voraussetzung für die modellmäßige Beschreibung der Pyrolyse ist die Kenntnis des Verhaltens des jeweiligen Einsatzstoffes im Prozess. Zur experimentellen Ermittlung des Pyrolyseverhaltens von Brennstoffen existieren international bereits diverse Anlagen. Jedoch eignen sich nicht alle zur vollständigen Bilanzierung. Je nach Forschungsaufgabe interessiert u. U. nur ein bestimmtes Produkt (z. B. Pyrolyseöl) oder die Funktionsweise ist auf ein enges Parameterfeld begrenzt.

Da der Pyrolyseprozess sowohl als Einzelverfahren für die Herstellung von Koks bzw. Teer/Öl oder zur Brennstoffaufbereitung als auch als Teilschritt bei Vergasungs- und Verbrennungsprozessen untersucht werden soll, ist ein breiter Bereich an Prozessbedingungen abzudecken. Hinsichtlich der technischen Anwendung der Ergebnisse wurde folgender Parameterbereich festgelegt:

- Pyrolysetemperatur: bis 800 °C
- Druck: 1…30 bar
- Aufheizgeschwindigkeit: 1…500 K/min
- Gasatmosphäre: inert
- Einsatzstoff: verschiedene Biomassen
- Korngröße: 1…6 mm

Die Pyrolyse von Biomasse als Einzelverfahren läuft zumeist im mittleren Temperaturbereich von 400 bis 600 °C ab (z. B. Holzkohleherstellung, Flash-Pyrolyse zur Ölgewinnung). Im Fall der Betrachtung als Teilschritt bei Vergasungs- und Verbrennungsprozessen können jedoch durchaus Temperaturen bis 800 °C für die Pyrolyse relevant sein. Der gewählte Druckbereich ist an die klassischen Vergasungsbedingungen angelehnt. Der breite Bereich verschiedener Aufheizgeschwindigkeiten ergibt sich aus den in Festbett- und Wirbelschichtreaktoren erreichbaren Werten.

Neben den Prozessparametern ergeben sich aus der Zielstellung des Projektes noch eine Reihe weiterer Anforderungen an die Versuchsanlage, die nachfolgend zusammengefasst sind:

- vollständige Bilanzierbarkeit,
- vollständige Rückgewinnung aller Produkte für nachfolgende Analysen,
- ausreichende Produktmengen für weitere Analysen,
- möglichst wenig komplexer Versuchsaufbau, einfaches Handling,
- Vermeidung von Sekundärreaktionen zwischen flüchtigen Produkten und Koks sowie innerhalb der flüchtigen Produkte durch möglichst geringe Verweilzeit der gasförmigen Produkte in der heißen Zone, um Aussagen zum Verhalten während der Primärpyrolyse zu erhalten.

3.2.2 Bewertung der Eignung von verschiedenen Reaktorprinzipien für die Bilanzierung der Biomassepyrolyse

Zur Pyrolyse von Biomasse eignen sich je nach Forschungsaufgabe oder bezüglich der Maximierung eines bestimmten Produktes verschiedene Reaktorprinzipien:

a) Festbett bzw. Wanderbett,
b) Wirbelschicht (stationär, zirkulierend),
c) Flugstrom/Fallrohr,
d) Reaktoren mit ablativer Wirkung,
e) Sonstige Reaktoren (z. B. Drahtnetz, Drehrohr).

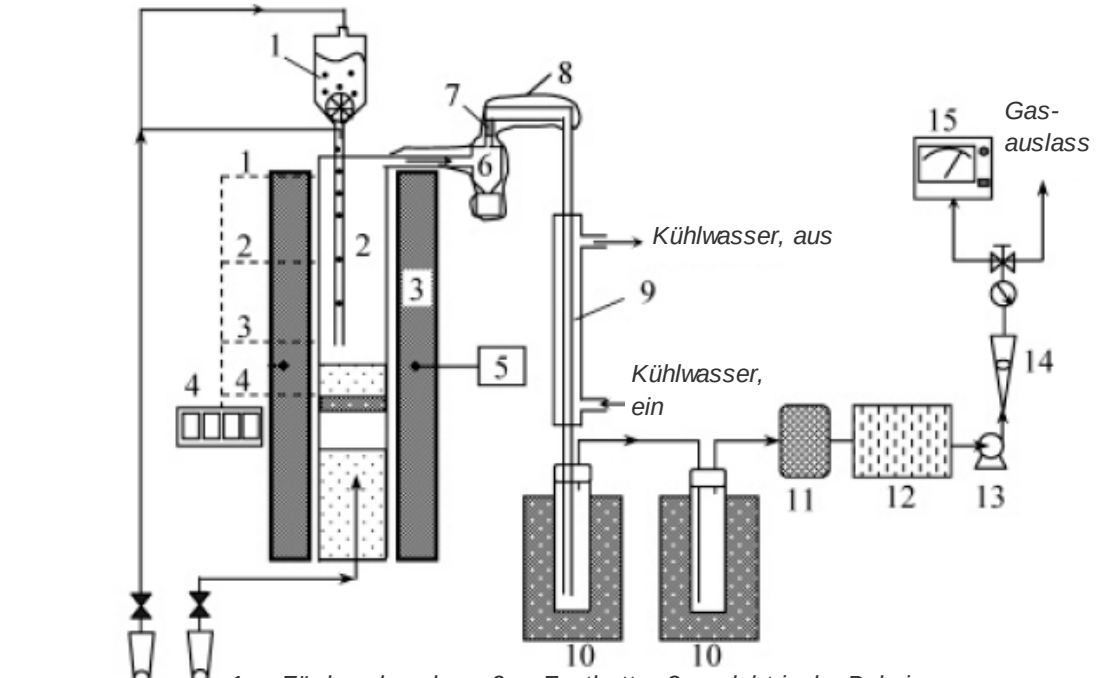
Die Reaktorbauarten für die ablative Pyrolyse werden in den nachfolgenden Betrachtungen nicht berücksichtigt, da hierbei aufgrund des Partikelkontaktes mit einer heißen Oberfläche nur sehr schnelle Aufheizgeschwindigkeiten realisierbar sind. Im Weiteren

werden auch die Thermowaagen (Festbett) aufgrund ihrer geringen Probemengen außen vor gelassen.

Die drei klassischen Prinzipien sowie der Drahtnetzreaktor sollen nachfolgend hinsichtlich der gestellten Anforderungen an die Versuchsanlage bewertet werden.

(a) Festbett-/Wanderbettreaktoren

Die Reaktoren zur Festbettpyrolyse von Biomasse lassen sich in zwei Kategorien einteilen: (1) Reaktoren mit diskontinuierlicher Fahrweise (Retorten in horizontaler oder vertikaler Anordnung) bei denen die Biomasse im Gefäß vorgelegt wird /Ates2006/, /Onay2004/, /Onay2004a/, /Raveendran1996/ und (2) Reaktoren mit kontinuierlichem Betrieb bei denen die Biomasse über ein Förderaggregat in den Reaktor eingetragen wird und dort auf einer Gasverteilerplatte liegen bleibt /Li2007/ (s. Abbildung 3-2).



1 Förderschnecke 2 Festbett 3 elektrische Beheizung
4 Thermoelemente (4 Stück) 5 Temperaturregler 6 Zyklon
7 Gewebefilter 8 Begleitheizung 9 Doppelmantel mit Wasserkühlung
10 Kondensatfallen (Eiswasserkühlung) 11 Glaswollefilter
12 Gastrocknung (Silicagel) 13 Pumpe 14 Gasmengenmessung
15 Gasanalysator (Micro-GC, FTIR)

Abbildung 3-2: Festbettreaktor mit kontinuierlichem Biomasseeintrag nach /Li2007/

Die letztgenannte Konfiguration ist aber bei den in der Literatur vorhandenen Untersuchungen in Festbettreaktoren eher die Ausnahme. Die Menge der vorgelegten Biomasse (Partikelgröße bis 2 mm) betrug in den betrachteten Untersuchungen zwischen 1 und 25 g. Die Beheizung erfolgte elektrisch. Die Temperatur der Biomasseschüttung kann über Thermoelemente im Inneren des Reaktors erfasst werden. Die Anlagen arbeiten ausschließlich unter atmosphärischen Druckbedingungen bei Temperaturen bis 900 °C. In den Retortenreaktoren erfolgt während des Versuchs nur bei einigen Anlagenkonfigurationen eine kontinuierliche Spülung mit Inertgas (bis 0,5 l/min). Die vorgelegte Biomasse wird in der Retorte zusammen mit dem Ofen auf Temperatur gebracht

weswegen lediglich Aufheizgeschwindigkeiten im Bereich zwischen 1 und 30 K/min erreicht werden. Nach dem Austreten der flüchtigen Bestandteile aus dem Reaktor gelangen diese durch eine meist zweistufige Kondensation (Kühlung über Eiswasser), um kondensierbare Produkte abzuscheiden. Einige Anlagen sind mit Möglichkeiten für die Gasmengenmessung oder die online-Gasanalytik ausgestattet.

In Festbettreaktoren lassen sich hohe Aufheizgeschwindigkeiten der Biomasseschüttung nur bei entsprechend geringen Reaktordurchmessern realisieren (bis 300 K/min bei d_i=8 mm /Onay2004/), wenn man von einer indirekten Wärmeübertragung zur Vermeidung von Verdünnungseffekten ausgeht. Dies führt je nach Probenvolumen zu relativ großen Baulängen. Größere Durchmesser der Biomasseschüttung führen aufgrund von Wärmetransportprozessen zu radialen Temperaturgradienten, die einen gleichmäßigen Pyrolysevorgang des gesamten Probenvolumens bei höheren Aufheizgeschwindigkeiten verhindern. Ein weiterer Nachteil ergibt sich aus der längeren Verweilzeit der Pyrolysegase in der Schüttung aus heißem Koks. Dadurch werden Sekundärreaktionen zwischen flüchtigen Pyrolyseprodukten (insbesondere den Kondensierbaren) und dem Koks gefördert, die die Produktverteilung und -zusammensetzung verändern (ggf. unterstützt durch im Koks enthaltene, katalytisch wirksame Elemente). Diese Reaktionen sind für das mit der geplanten Versuchsanlage verfolgte Ziel unerwünscht. Über einen kontinuierlichen Spülvorgang des Reaktors mit Inertgas ist es jedoch möglich eine Verkürzung der Gasverweilzeit in der heißen Zone zu realisieren. Vorteile dieser Reaktorbauart ergeben sich aus dem auch im Druckbetrieb einfachen Handling der Apparatur. Es kann ein breiteres Spektrum von Körnungen des Einsatzmaterials verwendet und im Fall von niedrigen Aufheizgeschwindigkeiten eine exakte Einstellung definierter Versuchsbedingungen erreicht werden. Die limitierende Größe bezüglich der minimalen Korngröße ist der Druckverlust der Schüttung, da die Durchströmbarkeit während des Pyrolysevorganges gewährleistet sein muss. Die Temperaturen in der Schüttung sind messtechnisch erfassbar.

(b) Wirbelschichtreaktoren

Zur Pyrolyse von Biomasse in Wirbelschichtreaktoren existieren in der Literatur diverse Beispiele /Aho2007/, /Westerhof2007/, /Wang2005/, /Lee2005/, /Aguado2000/, /Xianwen2000/, /Horne1996/, /Kaminsky1989/, /Funazukuri1986/ u. a. Die Anlagen lassen sich je nach Feststoffverweilzeit in stationäre (FB: fluidised bed) und zirkulierende Wirbelschichten (CFB: circulating fluidised bed) unterteilen. Die am häufigsten für Untersuchungen im Labor- und Technikumsmaßstab verwendete Bauart ist jedoch die stationäre Wirbelschicht, da hier der Anlagenaufwand verglichen mit einer zirkulierenden Wirbelschicht noch um einiges geringer ist. Daher wird im Folgenden auch nur auf derartige Anlagen eingegangen. Die wesentlichen Baugruppen der Anlagen sind ein Vorratsbehälter mit Förderaggregat (i.d.R. Schneckenförderer), der Reaktor mit Anströmboden, ein oder mehrere Zyklone zur Abscheidung von Kokspartikeln aus dem Gasstrom, eine mindestens 2-stufige Kondensation mit wahlweise indirekter Kühlung oder einem direkten Quench sowie eine Gaszufuhr (i.d.R. Stickstoff) zur Bettfluidisierung mit Gasvorwärmung. Eine derartige Anlagenkonfiguration für eine stationäre Wirbelschicht ist in Abbildung 3-3 dargestellt. Die Versuchsanlagen arbeiten unter atmosphärischen Druckbedingungen und bei Temperaturen zwischen 450 und 700 °C. Die Beheizung erfolgt elektrisch und die Temperaturerfassung ist i.d.R. an mehreren axial

verteilten Messstellen möglich. Als Bettmaterial kommt Quarzsand zum Einsatz, der entweder vor dem Versuch in den Reaktor eingebracht oder über einen separaten Vorratsbehälter und ein Förderaggregat in den Reaktor transportiert wird. Die angegebenen Durchsätze an Einsatzstoff lagen zwischen 0,25 g/h und 5 kg/h. Die Korngrößen der eingesetzten Materialien betrugen 0,35 bis 5 mm.

Wirbelschichtreaktoren zeichnen sich vor allem durch hohe Wärmeübertragungsraten infolge des Kontaktes von Einsatzstoff und heißem Bettmaterial aus (mehrere 100 K/min). Dies erfordert allerdings auch entsprechend kleine Partikelgrößen. Der regelungs- und anlagentechnische Aufwand ist für derartige Kleinanlagen im Vergleich zu Festbettreaktoren aufgrund des Handlings von Biomasse und Wärmeträger sowie der Aufrechterhaltung der Wirbelschicht (Bettfluidisierung) bedeutend größer. Für die Bilanzierung gestaltet sich besonders die Bestimmung der gebildeten Koksmenge schwierig, da die Kokspartikel zusammen mit dem Bettmaterial ausgetragen werden und somit eine Trennung von beidem notwendig wird. Die Realisierung einer Wirbelschicht ohne Bettmaterial ist aufgrund der geringen Wärmeübertragungsraten zwischen Gas und Partikel nicht sinnvoll. Die gewünschte geringe Verdünnungsrate des Pyrolysegases kann mit dieser Reaktorbauart ebenfalls nicht realisiert werden, da größere Inertgasmengen für die Ausbildung der Wirbelschicht notwendig sind. Die Untersuchung der Pyrolyse bei niedrigeren Aufheizgeschwindigkeiten ist mit diesem Verfahrensprinzip nicht möglich. Vorteilhaft bei der Wirbelschichtpyrolyse ist die Tatsache, dass Sekundärreaktionen zwischen Koks und Pyrolysegasbestandteilen infolge der kurzen Gasverweilzeit (0,05 bis 3 s) in der heißen Zone stark vermindert werden.

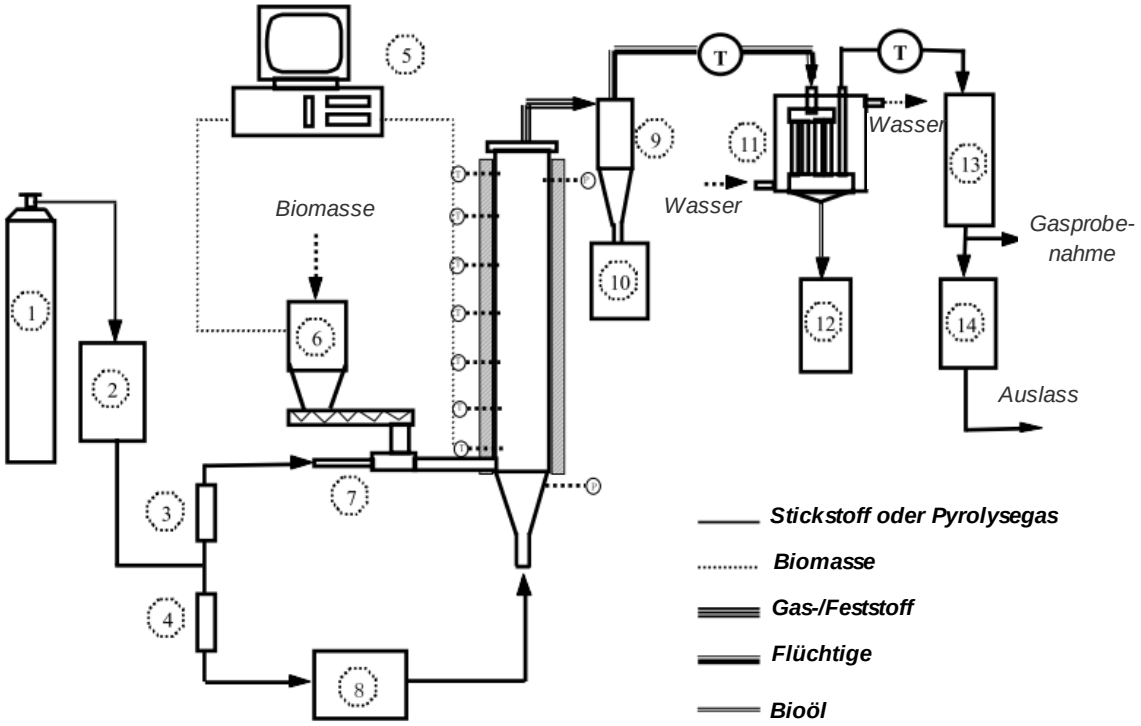
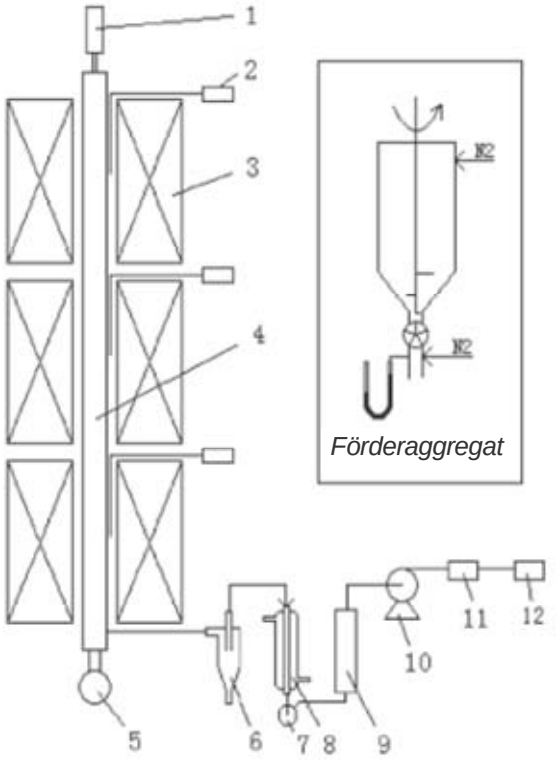


Abbildung 3-3: Anlagenkonfiguration für eine stationäre Wirbelschicht zur Pyrolyse von Biomasse nach /Wang2005/

(c) Flugstrom-/Fallrohrreaktoren

Untersuchungen zur Pyrolyse von Biomasse in Fallrohrreaktoren finden sich in /Zhang2006/, /Onay2006/, /Li2004/, /Cetin2004/, /Zanzi2002/, /Steinberg1985/ und für Torf in /Letho2007/. In Abbildung 3-4 ist beispielhaft eine Anlagenkonfiguration eines bei atmosphärischen Druckbedingungen arbeitenden Fallrohrreaktors dargestellt. Die Arbeitsweise der Anlagen ist für eine bestimmte Probemenge, die in einem Vorratsbehälter (u. U. mit Rührwerk ausgestattet) vorgelegt wird, kontinuierlich. Die Zuführung der Biomasse zum Reaktor erfolgt wahlweise über Förderschnecken oder Zellradschleusen (s. Abbildung 3-4) mit dosiertem Massenströmen im Bereich zwischen 0,07 und 500 g/h. Eine Beaufschlagung des Vorratsbehälters mit Inertgas ist in den meisten Fällen möglich. Als Inertgas wurde in den Untersuchungen Stickstoff (0,3 bis 15 l/min i.N.) verwendet. Einige Anlagen sind jedoch zusätzlich mit Luft, Wasserdampf oder Wasserstoff als Reaktionspartner betreibbar.



1 Förderaggregat (Zellradschleuse)
2 Thermoelement
3 elektrische Beheizung
4 Reaktionsrohr
5 Koksauffangbehälter
6 metallischer Filter
7 Teerfalle
8 Kondensation
9 Glaswollefilter
10 Vakuumpumpe
11 Gasuhr
12 Gasbag

Abbildung 3-4: Anlagenkonfiguration eines Fallrohrreaktors für die Pyrolyse von Biomasse unter atmosphärischen Druckbedingungen und Temperaturen bis 800 °C /Li2004/

Das Reaktionsrohr weist Innendurchmesser zwischen 12 und 50 mm auf und wird auf Längen zwischen 150 und 2900 mm elektrisch beheizt. Zu diesem Zweck existieren i.d.R. mehrere Heizzonen, die unabhängig voneinander angesteuert werden können. Die Temperaturkontrolle erfolgt über mehrere über die Länge verteilte Thermoelemente. Maximaltemperaturen werden im Bereich zwischen 800 und 1.500 °C angegeben. Bis auf eine Ausnahme (34,5 bar H_2) arbeiten die betrachteten Anlagen unter atmosphärischen Druckbedingungen. Die über das Förderaggregat in den Reaktor eingebrachte Biomasse wird infolge der Schwerkraft bzw. unterstützt durch die am oberen Ende des Rohres zugegebene Menge an Inertgas (u. U. vorgewärmt) nach unten

transportiert, heizt sich dabei auf und pyrolysiert. Der entstehende Koks fällt in einen unterhalb der beheizten Zone montierten Behälter (wahlweise beheizt bis max. 300 °C) und verbleibt dort bis zum Ende des Versuchs. Zur Rückhaltung von im Gasstrom mitgerissenen Partikeln werden metallische Filter eingesetzt. Daran schließen sich eine oder mehrere Kondensationsstufen (Kühlung über Eiswasser, Trockeneis oder Kältemittel) zur Rückhaltung von Teeren und Wasser an. Teilweise erfolgen anschließend die Messung der Gasmenge und eine online-Gasanalyse.

Mit Flugstrom-/Fallrohrreaktoren lassen sich sehr hohe Aufheizgeschwindigkeiten (> 1000 K/s) realisieren. Das Körnungsband der Einsatzstoffe ist dabei allerdings auf sehr geringe Partikelgrößen (< 0,5 mm) beschränkt. Größere Partikel (bis 2 mm) lassen sich in derartigen Systemen bei einer ausreichend dimensionierten beheizten Länge ebenfalls umsetzen, jedoch liegen die Aufheizgeschwindigkeiten aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeiten von Biomassen dann etwas niedriger. Die Partikelaufheizrate ist messtechnisch nur sehr schwer erfassbar. Eine Variation ist nicht möglich. Zum Ablaufen der Pyrolysevorgänge ist eine bestimmte minimale Verweilzeit erforderlich, die nur über entsprechend große Baulängen erreicht werden kann. Es treten kaum Sekundärreaktionen zwischen Pyrolysegasbestandteilen und Koks auf, wenn eine entsprechende Strömungsgeschwindigkeit der Gase gewährleistet wird.

(d) Drahtnetzreaktoren (wire mesh reactor)

Eine häufig für Untersuchungen des Pyrolyseverhaltens bei sehr hohen Aufheizraten angewendete Versuchsanordnung sind sogenannte Drahtnetzreaktoren (*engl:. wire mesh reactor*). Vorteile dieses Prinzips ergeben sich aus der Möglichkeit zum raschen Abzug der gebildeten flüchtigen Produkte, was zur Verhinderung von Sekundärreaktion führt und es somit erlaubt den primären Pyrolyseprozess zu untersuchen. Infolge des elektrischen Impulses und der geringen Probemengen (mg-Bereich) ergeben sich sehr schnelle maximale Aufheizraten von bis zu 5.000 K/s /Drummond1996/. Eine Variation bis zu 0,01 K/s ist ebenfalls möglich. Nachteilig sind die bei den Versuchen eingesetzten sehr geringen Probemengen, weshalb sich nur geringe Produktmengen ergeben, die für die vollständige brennstofftechnische Charakterisierung der Produkte nicht ausreichen.

Nach der Beschreibung der charakteristischen Eigenschaften sowie der Vor- und Nachteile der für die Pyrolyseuntersuchungen relevanten Reaktorprinzipien gibt Tabelle 3-10 eine zusammenfassende Bewertung der einzelnen Verfahren.

Nach umfassender Literaturstudie, der Herausstellung von Vor- und Nachteilen der Anlagenprinzipien (Festbett, Wirbelschicht, Flugstrom, Drahtnetzreaktor) und Berücksichtigung der gestellten Anforderungen an die Versuchsanlage zur Druckpyrolyse von Biomassen soll ein Konzept realisiert werden, das wahlweise den Betrieb im Flugstrom und im Festbett ermöglicht. Der Flugstrombetrieb dient dabei dem Erreichen hoher Aufheizraten, wobei nur sehr kleine Partikelgrößen (< 1 mm) eingesetzt werden können. Die Option des Festbettbetriebes lässt die Einstellung definierter jedoch langsamerer Aufheizgeschwindigkeiten (max. 50 K/min) bei simultaner Aufheizung von Ofen und Probe zu und ermöglicht den Einsatz größerer Partikel.

Tabelle 3-10: Bewertung der Reaktorprinzipien hinsichtlich der gestellten Anforderungen an die Versuchsanlage zur Biomassepyrolyse

Anforderung	Festbett/ Wanderbett	Wirbelschicht	Flugstrom/ Fallrohr	Drahtnetz
Temperatur bis 800 °C	möglich	möglich	möglich	möglich
Druckbetrieb	möglich	möglich	möglich	möglich
Realisierung hoher Aufheizgeschwindigkeiten	--	++	++	++
Variation der Aufheizgeschwindigkeit	+	-	-	+
Anlagenaufwand/Handling	++	--	-	++
Vermeidung von Sekundärreaktionen	+/-	+	++	++
genaue Bilanzierung der Produkte	möglich	schwierig	möglich	möglich
vollständige Produktrückgewinnung	möglich	möglich/ aufwendig	möglich/ aufwendig	möglich
ausreichende Produktmengen	++	++	++	--
Verdünnungsrate des Pyrolysegases	++	--	+	++
Variation der Körnung	+	+	-	-

Legende: ++ besonders günstig; + günstig; +/- je nach Bauart möglich; - ungünstig; - - besonders ungünstig

3.2.3 Festbettpyrolyseanlage (Labormaßstab)

Die Festbettlaborpyrolyseanlage (s. Abbildung 3-5) wurde im Rahmen des Projektes eigens für die Bilanzierung der Pyrolyse unter Variation verschiedener Parameter aufgebaut. Sie ist somit speziell auf die gestellten Anforderungen (s. Kapitel 3.2.1) abgestimmt. Ergänzend zur wesentlich komplexer aufgebauten Druckpyrolyseanlage bot sie die Möglichkeit zahlreicher Untersuchungen zum Einfluss der Temperatur und der Aufheizgeschwindigkeit bei der Pyrolyse verschiedener Biomassen unter atmosphärischen Druckbedingungen zu realisieren. Die wesentlichen Baugruppen der Anlage sind der Reaktor mit Beheizung, die Gasversorgung (mit MFC), die 2-stufige Kondensation und das Gasauffang- und -probenahmesystem. Die Charakteristika der Versuchsanlage sind in Tabelle 3-11 zusammenfassend dargestellt.

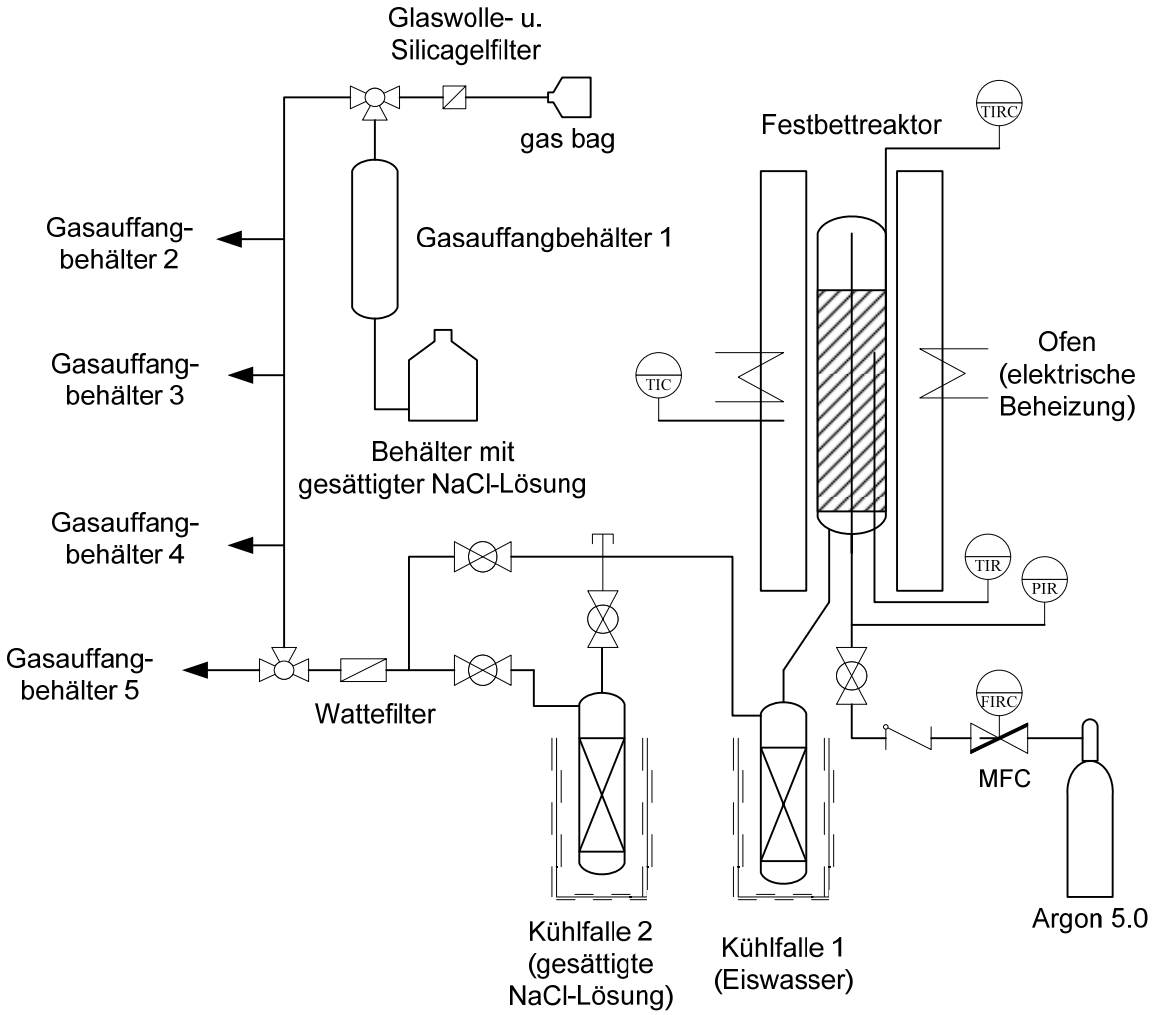


Abbildung 3-5: Schema der Festbettlaborpyrolyseanlage

Die Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit der gewonnenen Ergebnisse konnte mit zahlreichen Versuchen nachgewiesen werden. Die Anlage ist von der Einsatzmenge so optimiert, dass sich für alle eingestellten Prozessbedingungen ausreichende Mengen an Pyrolyseprodukten für die Analysen ergeben. Ein Nachteil der Anlage ergibt sich aus dem aufwändigen Handling, weshalb nur ein bis maximal zwei Versuche am Tag möglich sind.

Tabelle 3-11: Anlagen- und Einsatzstoffparameter für die Festbettlaborpyrolyseanlage

Anlagenparameter	*Variationsbereich*	*Bemerkungen*
Reaktorprinzip:	Festbett	
Reaktorabmessungen		
Durchmesser:	20 mm	limitiert augrund Wärmeleitung der Schüttung (Aufheizgeschwindigkeit)
Höhe:	335 mm	limitiert durch Abmessung Röhrenofen (Länge der temperaturkonstanten Zone)
Beheizung:	Röhrenofen (elektrisch), L = 500 mm	
Heizleistung Ofen:	1,15 kW (el)	Einstellung der Ofenleistung zwischen 0 und 100 % möglich mittels Spannungstransformator
max. Ofentemperatur:	900°C	begrenzt durch Material Heizelemente
max. Probentemperatur:	750°C	
Aufheizgeschwindigkeit:	1…150 K/min	1…40 K/min bei simultaner Aufheizung von Ofen und Reaktor; 40…150 K/min bei Vorwärmung des Ofens
Druck:	atmosphärisch	bis 5 bar möglich bei Integration eines Feinstnadelventils (Anmerkung: schwieriges Handling)
Gasatmosphäre:	Argon	
Spülgasmenge:	max. 600 ml/min (i.N.)	Regelung über MFC
Kondensation:	2-stufig	
	1. Stufe: eiswassergekühlt (0°C)	Konstruktionsbedingt; Verhinderung des Ausfrierens von Wasser in der Rohrleitung
	2. Stufe: Kühlung über gesättigte NaCl-Lösung (-18 °C); Tetrahydrofuran im 2. Kondensatauffangbehälter	THF fungiert als Lösungsmittel für Teer/Öl-Dämpfe und sorgt damit für eine bessere Rückhaltung
Gasauffangsystem:	4x 1000 ml Gasmaus gefüllt mit gesättigter NaCl-Lösung (angesäuert); 1x 35 l Tank gefüllt mit gesättigter NaCl-Lösung (angesäuert)	Verminderung der Löslichkeit von Gaskomponenten ggü. reinem Wasser
Einsatzstoffparameter		
Rohstoffe/ Darreichungsform:	Biomasse; Halmgut, Hackgut, Späne, Pellets (zerkleinert)	
Korngröße:	1…6 mm	limitiert durch Reaktordurchmesser, Einbauten, Druckverlust
max. Probemenge:	ca. 15 - 20 g	abhängig vom Einsatzstoff

3.2.4 Druckpyrolyseanlage

Das gewählte Reaktorkonzept für die Druckpyrolyseanlage (nachfolgend DPA genannt) stellt eine Kombination aus den Betriebsweisen Fallrohr- und Festbettreaktor dar. Für die Umstellung des Anlagenbetriebes von einer auf die andere Variante sind lediglich kleinere Umbaumaßnahmen erforderlich. Ein Fließbild der Anlage ist in Abbildung 3-6 gegeben.

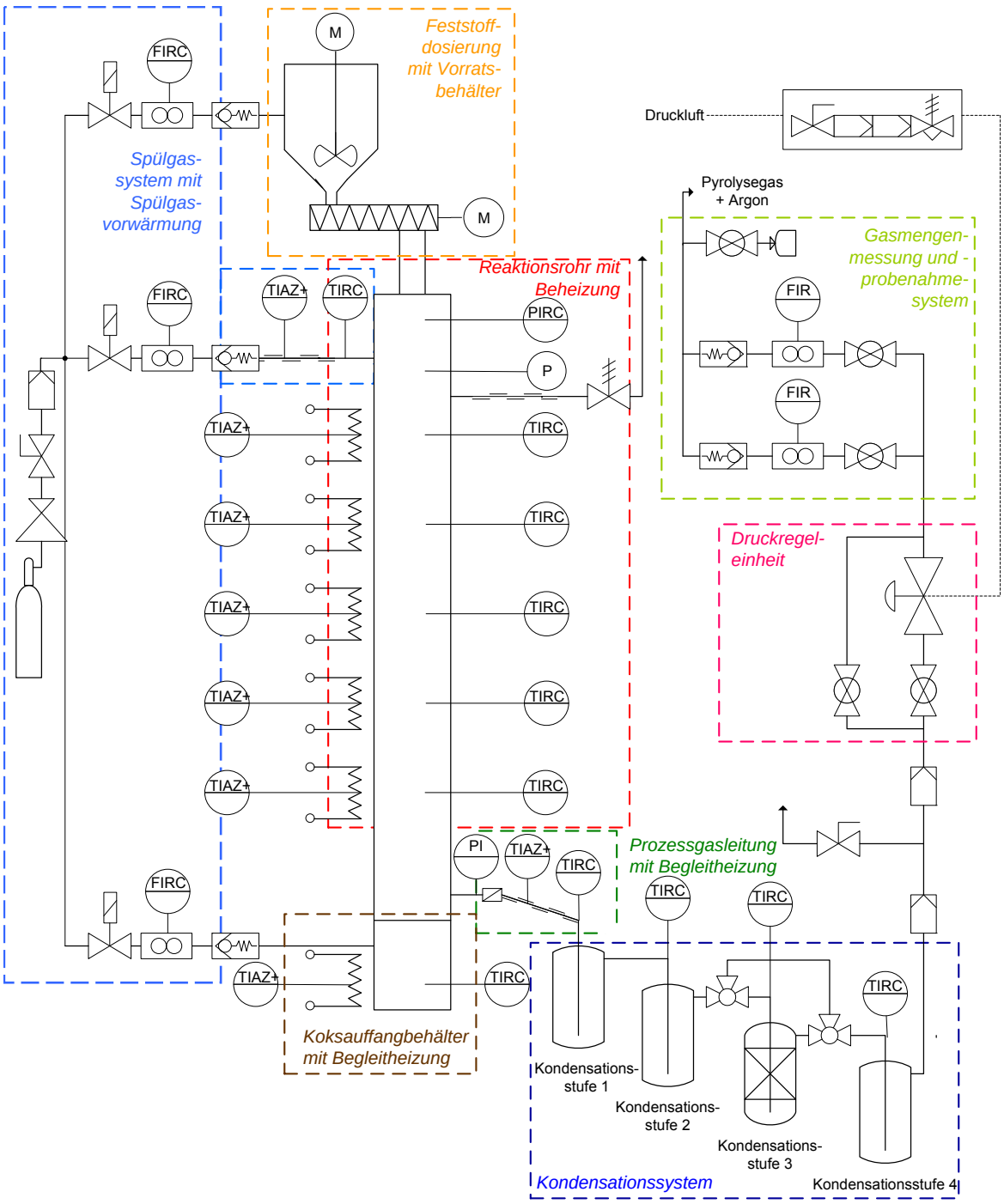


Abbildung 3-6: Fließschema der Druckpyrolyseanlage (DPA) mit Kennzeichnung der Hauptkomponenten

Die DPA besteht aus den nachfolgend aufgeführten Komponenten/Baugruppen, deren Aufbau/Funktion im Weiteren dargestellt wird:

a. Feststoffdosierung mit Vorratsbehälter,
b. Spülgassystem mit Spülgasvorwärmung,
c. Reaktionsrohr mit Beheizung,
d. Koksauffangbehälter mit Begleitheizung,
e. Prozessgasleitung mit Begleitheizung,
f. Kondensationssystem (4-stufig),
g. Druckregeleinheit,
h. Gasmengenmessung und -probenahmesystem sowie
i. Steuer- und Regeleinrichtungen inkl. Prozessdatenerfassung,

a. *Feststoffdosierung mit Vorratsbehälter (s. Abbildung 3-7):* Die Feststoffdosierung stellt ein wesentliches Bauglied der DPA zur Realisierung des kontinuierlichen Betriebes im Fallrohrmodus dar. Der Vorratsbehälter weist ein nutzbares Volumen von 1 l auf. Dies entspricht ca. 200 g an Biomasse mit einer Körnung bis 2 mm. Da Biomasse infolge ihrer Faserstruktur ein schwierig zu dosierendes Gut darstellt, ist der Vorratsbehälter mit einem stufenlos einstellbaren Rührwerk (max. 34 U/min) ausgestattet. Dabei können über die Eingabemaske am Bildschirm EIN- bzw. AUS-Zeiten vorgegeben werden. Durch die kontinuierliche Bewegung des Einsatzstoffes soll eine Brückenbildung im Bereich der Verengung zwischen konischem Bereich des Vorratsbehälters und dem Eintritt in die Förderschnecke verhindert werden. In Vorversuchen zur Dosierbarkeit der Einsatzstoffe hat sich herausgestellt, dass sich ein kontinuierlicher Rührwerkbetrieb günstiger auf die Dosierbarkeit auswirkt als der diskontinuierliche Betrieb mit EIN-/AUS-Zeiten. Bezüglich des zu dosierenden Mengenstroms ergibt sich aufgrund der Realisierung einer Einzelkornpyrolyse und der Durchflussbereiche der Gasmengenmessung eine Begrenzung auf Werte bis 5 g/min und somit auch eine Limitierung der Drehzahl für das Rührwerk. Bei zu hoher Rührwerksdrehzahl wird zu viel Gut in die Förderschnecke transportiert, welches aufgrund des über die Schneckendrehzahl eingestellten geringen Massenstroms von dieser nicht so schnell abtransportiert werden kann. Es kommt unweigerlich zur Verstopfung des Förderaggregates und somit zum Stillstand. Aus diesem Grund wurde der Motor des Rührwerkes mit einem Frequenzumrichter ausgestattet, um die Drehzahl weiter drosseln zu können und somit eine optimale Betriebsweise des Förderaggregates zu realisieren. Das Dosierorgan war zu Beginn als Spiralfederdosierung (s. Abbildung 3-7) ausgeführt. In Vorversuchen kam es aber insbesondere im Druckbetrieb immer wieder zur Verstopfung der Zwischenräume der Feder, so dass im Weiteren mit einer Vollblattschnecke (s. Abbildung 3-7) gearbeitet wurde, deren Anfälligkeit gegenüber von Verstopfungen weitaus geringer war. Der Nachteil dieser Variante lag darin, dass sich sehr geringe Massenströme im Bereich um 2,5 g/min nicht mehr konstant einstellen ließen. Es musste folglich bei Werten zwischen 4 und 6 g/min gearbeitet werden.

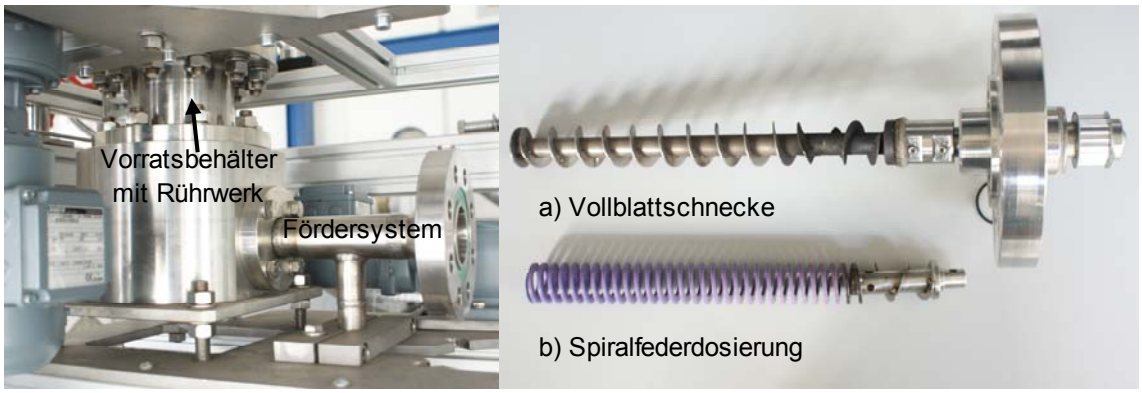


Abbildung 3-7: Feststoffdosierung mit Vorratsbehälter (rechts) und Schneckenfördersysteme (links) der Druckpyrolyseanlage

Die Dosierung stellte lange Zeit den Knackpunkt der Versuchsanordnung dar. In Vorversuchen mit verschiedenen Partikelgrößen und Einsatzstoffen konnten jedoch optimale Parameter für die Kombination aus Rührwerk und Förderschnecke gefunden werden. Eine Anpassung der Korngröße des Einsatzstoffes ergab sich dahingehend, dass das Feingut (< 0,2 mm) entfernt wurde, da insbesondere der hohe Feinanteil Verstopfungen in Vorratsbehälter und Förderschnecke begünstigte.

b. *Spülgassystem mit Spülgasvorwärmung:* Zur Realisierung der Sauerstofffreiheit im System, des Druckaufbaus und zur Gewährleistung einer gewissen Strömungsgeschwindigkeit während des Pyrolyseversuchs wird der Reaktor mit einem Spülgas (Argon 5.0, Reinheit: 99,999 Vol-%) beaufschlagt, welches weder an der Reaktion teilnimmt noch dabei gebildet wird. Zudem hat Argon den Vorteil, dass es infolge seiner relativ hohen Dichte (1,7841 g/l i.N.), schwerer ist als die entstehenden Pyrolysegase und somit eine Ansammlung letzterer im unteren Anlagenabschnitt (Koksauffangbehälter) vermieden werden kann. Die Beaufschlagung des Reaktors mit Argon kann an drei verschiedenen Stellen erfolgen: über den Feststoffvorratsbehälter, am oberen Ende des Reaktionsrohres (oberhalb der beheizten Zone) und am Koksauffangbehälter. Die Gasmengenströme werden über drei Massendurchflussmesser (MFC) geregelt, die einen maximalen Durchfluss von insgesamt 130 l/h i.N. erlauben. Die Staffelung ergibt sich dabei von oben nach unten zu 10, 60 und 60 l/h i.N. Für den Spülgasstrom, der am oberen Ende des Reaktionsrohres eintritt, ist eine Gasvorwärmung bis auf Temperaturen von 400 °C möglich.

c. *Reaktionsrohr mit Beheizung (s. Abbildung 3-8):* Der eigentliche Reaktionsraum ist ein Rohr mit einem Innendurchmesser von 20 mm und einer Länge von 1.700 mm. Die Beheizung des Reaktors erfolgt elektrisch über 5 getrennt regelbare Heizzonen (elektrische Leistung: je 1,5 kW), die eine maximale Temperatur von 800 °C ermöglichen. Die beheizte Länge des Reaktionsrohres ergibt sich zu 1.100 mm. Oberhalb und unterhalb der beheizten Zone sind weitere Begleitheizungen an den Rohrteilstücken angebracht, da sich in Vorversuchen herausstellte, dass eine Isolierung zur Aufrechterhaltung der Temperatur im Hinblick auf das Verhindern der Kondensation flüchtiger Bestandteile nicht ausreichend ist.

Abbildung 3-8: Druckpyrolyseanlage von vorn (links) und Koksauffangbehälter mit Begleitheizung und Prozessgasableitung (rechts)

Wie bereits erwähnt ist der Betrieb der Anlage wahlweise im Fallstrom (mit Feststoffdosierung: quasikontinuierlicher Betrieb) oder im Festbett (diskontinuierlicher Betrieb) möglich. Abbildung 3-9 zeigt die Gasflüsse und die Partikelbewegung für beide Betriebsvarianten schematisch. Im Fallrohrbetrieb erfolgt die Dosierung der vorgelegten Biomassemenge kontinuierlich über die Förderschnecke. Beim Fallen der Partikel durch den Reaktionsraum kommt es zu einer schnellen Aufheizung auf Reaktionstemperatur und zur Entgasung der flüchtigen Bestandteile. Der bei der Reaktion anfallende Koks wird in einem Behälter am unteren Rohrende aufgefangen (s. Punkt d. Koksauffangbehälter mit Begleitheizung, S. 43).

Bei der Festbettvariante wird die Dosiereinrichtung inklusive Vorratsbehälter an der Flanschverbindung vom Reaktionsrohr getrennt und mit einem Flanschdeckel verschlossen. Vorher wird ein metallisches Innenrohr mit einem Durchmesser von 10 mm in das Reaktionsrohr eingebracht. Das Innenrohr ist über Länge und Querschnitt mit 1-mm-Bohrungen versehen, die einen Gasabtransport aus der Festbettschüttung in den inneren Hohlraum ermöglichen sollen. Der Einsatzstoff wird zwischen Reaktionsrohr und Innenrohr in den Ringspalt eingefüllt. Durch eine Art Probenträger wird sichergestellt, dass sich die Biomasseschüttung in der beheizten Zone befindet. Der Koksauffangbehälter wird für den Festbettbetrieb ebenfalls entfernt und durch einen Flanschdeckel ersetzt. Im Festbettbetrieb erfolgt die Aufheizung von Einsatzstoff und Beheizung simultan unter Vorgabe definierter Aufheizgeschwindigkeiten (bis 50 K/min).

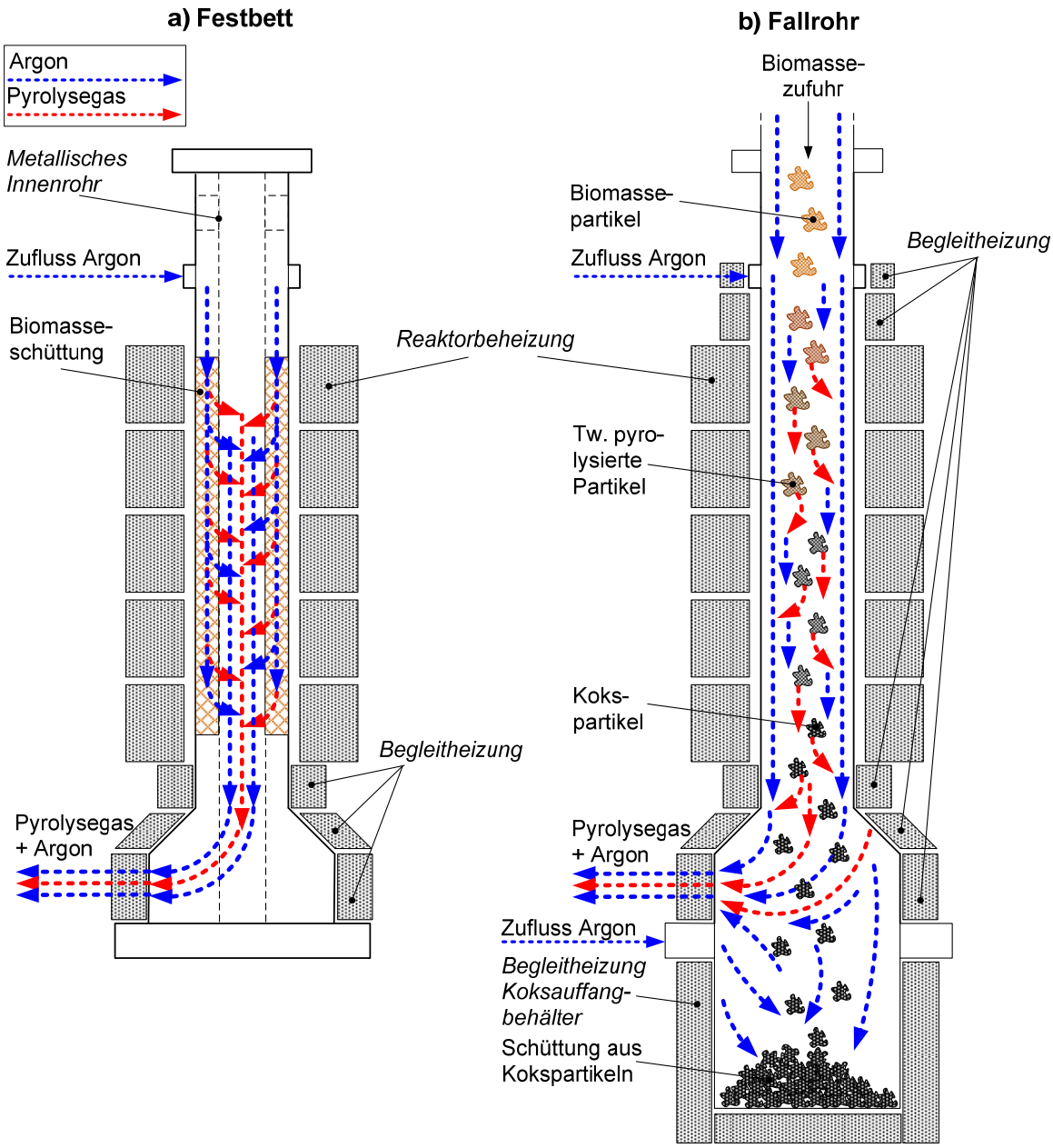


Abbildung 3-9: **Schematische Darstellung der Betriebsweisen der Druckpyrolyseanlage einschließlich Gasflüsse: a) Festbett (links), b) Fallrohr (rechts)**

d. *Koksauffangbehälter mit Begleitheizung (s. Abbildung 3-8):* Am unteren Ende des Reaktionsrohres, nach der Prozessgasableitung befindet sich der Koksauffangbehälter in dem sich der bei der Pyrolyse gebildete feste, kohlenstoffhaltige Rückstand sammelt. Eine elektrische Begleitheizung (0,7 kW) mit einer maximal einstellbaren Temperatur von 400 °C, verhindert die Kondensation dampfförmiger Verbindungen aus dem Pyrolysegas. Der Behälter ist über eine Flanschverbindung an das Reaktionsrohr gekoppelt. Hier befindet sich auch der untere Spülgasanschluss, der dazu dient Reste an Pyrolysegas aus der Koksschüttung zu verdrängen. Um den Austrag der Kokspartikel nach Versuchsende zu realisieren, existiert eine fahrbare Vorrichtung einschließlich Kippmechanik in die der Behälter abgelassen werden kann. Dies ermöglicht die vollständige Rückgewinnung des im Auffangbehälter verbliebenen Kokses, sowie dessen mengenmäßige Erfassung.

e. *Prozessgasleitung mit Begleitheizung:* Die Abfuhr des Prozessgases aus dem Reaktor erfolgt in der Querschnittserweiterung (konischer Teil) am unteren Ende des Reaktionsrohres. Nach der Abführung wurde nachträglich ein metallischer Filter integriert, der die Rückhaltung von im Gasstrom mitgerissenen Kokspartikeln gewährleistet. Die Rohrleitung zwischen Prozessgasableitung aus dem Reaktionsrohr und der 1. Kondensationsstufe ist mit einer elektrischen Begleitheizung (0,25 kW) versehen, die das Einstellen einer maximalen Temperatur von 450 °C erlaubt. Dies dient dem Verhindern der Kondensation von dampfförmigen Bestandteilen aus dem Pyrolysegas. Die Festlegung der Maximaltemperatur erfolgte auf Basis von Literaturangaben gemäß den Kondensationspunkten der in den flüchtigen Bestandteilen vorkommenden Leitkomponenten inklusive einer gewissen Sicherheit. In der ursprünglichen Ausführung war die Prozessgasleitung so angelegt, dass sie mit drei 90°-Biegungen versehen war und auf dem Weg zur 1. Kondensationsstufe ein Höhenniveau nach oben zu überwinden hatte. Dies erwies sich für den laufenden Betrieb als ungünstig. Zudem fördert der längere zurückgelegte Weg bei Temperaturen bis max. 450 °C sekundäre Crackreaktionen zwischen den flüchtigen Bestandteilen. Aufgrund dieser Tatsache erfolgten verschiedene Umbaumaßnahmen. Das Höhenniveau der 1. Kondensationsstufe wurde soweit abgesenkt, dass eine leicht abfallende Leitung verlegt werden konnte. Weiterhin wurde der Befestigungsort der Kondensationsstufe so verändert, dass sich das beheizte Rohrteilstück auf ca. 450 mm verkürzte.

f. *Kondensationssystem:* Das Kondensationssystem besteht insgesamt aus vier baugleichen Stufen. Die Kühlung erfolgt indirekt auf einer Länge von je 300 mm, wobei ein Ethylenglycol-/Wassergemisch als Kühlmedium zum Einsatz kommt, welches durch einen Umwälzkühler auf -20 °C temperiert wird. Die Stromführung für Gas und Kühlmittel erfolgt dabei entgegengesetzt. Für den Betrieb der Anlage werden aktuell nur drei Kondensationsstufen genutzt. Die einzelnen Kühlfallen sind nach dem Prinzip einer „Waschflasche“ konstruiert, um eine effektivere Kühlung des Gasstroms erreichen zu können. Das Prozessgas strömt zunächst in einem metallischen Innenrohr nach unten und anschließend im äußeren Ringspalt wieder nach oben (s. Abbildung 3-10). Die im Prozessgas enthaltenen kondensierbaren Bestandteile werden dabei in die flüssige Phase abgeführt und verbleiben in den Kondensatfallen. Der untere Teil der Kondensationsstufe ist so ausgeführt, dass er über eine Schraubverbindung vom Rest abgetrennt und so das Kondensat für die Mengenbestimmung sowie die weitere Analyse gewonnen werden kann. Zur Erhöhung der Kühlwirkung sind die Kondensatfallen im unteren Bereich mit einer Schüttung aus metallischen Füllkörpern bestückt. In der dritten Kondensatstufe wird zusätzlich Tetrahydrofuran als Lösungsmittel eingebracht, das den Effekt einer chemischen Wäsche erfüllt. Um während des Spül- bzw. Bespannungsvorgangs sowie der Abkühlphase den Austrag von THF zu vermeiden, ist ein Bypass für den Gasstrom integriert, der über zwei 3-Wege-Kugelhähne bedient werden kann. Nach dem Kondensationssystem sind noch zwei Filter in die Prozessgasleitung eingebaut, um u. U. im Gasstrom verbliebene kondensierbare Bestandteile aufzufangen und so das Druckregelventil sowie die Massendurchflussmesser vor Verunreinigungen zu schützen.

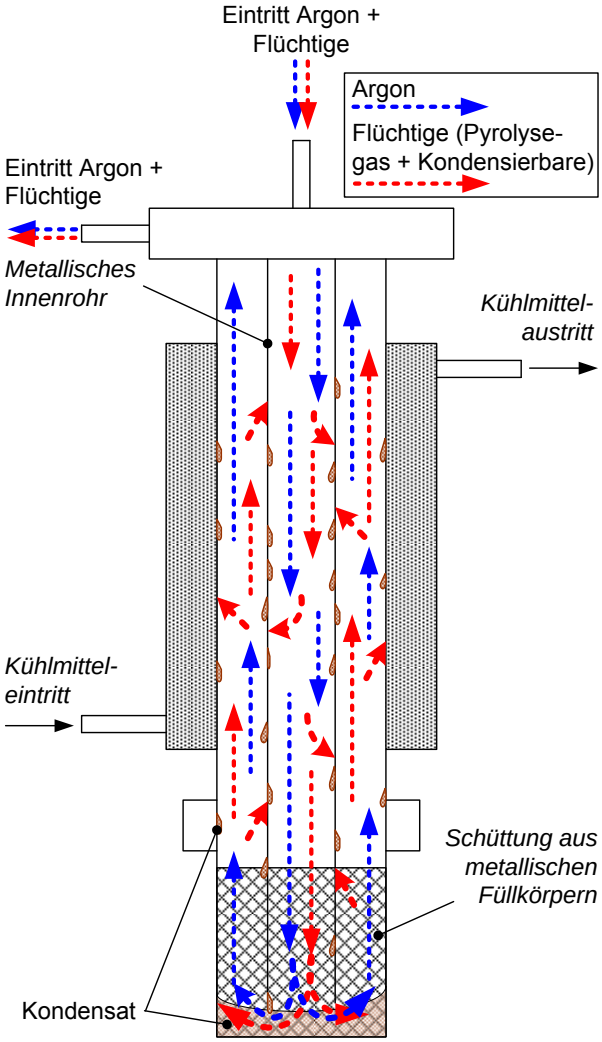


Abbildung 3-10: **Schematische Darstellung der ersten Kondensationsstufe inkl. Gasflüsse (links) sowie Foto der Anlagenkomponente (rechts)**

g. *Druckregelung:* Die Regelung des eingestellten Anlagendruckes erfolgt über ein Druckregelventil der Fa. Samsung. Dabei ergeben sich zwei Betriebsweisen, deren Einstellung auf der Bedienoberfläche der Prozesssoftware erfolgt. Zum einen ist der Betrieb mit Druckregelung *(Druckregelung EIN)* möglich und zum anderen können manuell feste Öffnungsgrade des Ventils in 1%-Schritten *(Druckregelung AUS)* vorgegeben werden. Der Sollwert für den gewünschten Anlagendruck ist auf der Bedienoberfläche vorzugeben (Angabe in bar (Ü). Die Regelung erfolgt über eine Messstelle am oberen Ende des Reaktionsrohres. Eine weitere Druckmessstelle befindet sich in der Prozessgasableitung vor dem metallischen Filter. Der Wert wird sowohl auf der Bedienoberfläche des PC als auch auf einem Manometer an der Anlage angezeigt. Beim Betrieb der Anlage wurde festgestellt, dass der Druckverlust über das Regelventil es nicht erlaubt Versuche unter atmosphärischen Bedingungen durchzuführen. Selbst bei vollständig offenem Ventil baut sich infolge der gebildeten Pyrolysegase und dem Druckverlust des Ventils ein Druck von bis zu 3 bar (Ü) auf. Das freie Abströmen des Prozessgasgemisches ist somit nicht gewährleistet. Für Untersuchungen unter atmosphärischen Druckbedingungen erfolgte der Einbau eines Bypasses um das Druckregelventil, welcher über einen 2-Wege Kugelhahn absperrbar ist. Generell arbeitet die

Druckregelung bei sehr geringen Drücken (bis 5 bar (Ü)) sehr träge, was zur Folge hat, dass die Druckschwankungen bei diesen Versuchen wesentlich größer ausfallen.

h. *Gasmengenmessung und -probenahmesystem:* Die Bestimmung des Prozessgasmengenstroms (Spülgas + entstandenes Pyrolysegas) erfolgt über Massendurchflussmesser (MFM), die sich nach dem Druckregelventil im atmosphärischen Bereich befinden. Je nach gewählten Versuchsbedingungen, dosiertem Biomassemengenstrom und dem daraus resultierenden Gasvolumenstrom stehen zwei Geräte mit unterschiedlichen Durchflussbereichen (max. 200 l/h bzw. max. 1.500 l/h i.N. Argon) zur Verfügung. Die Verwendung von zwei Geräten erwies sich als notwendig, da die Messfehler der MFM in den Bereichen unterhalb von 5 und oberhalb von 95 % des maximalen Durchflussbereiches exponentiell ansteigen. Ein Umschalten der Gasflüsse ist im laufenden Betrieb über 2-Wege-Kugelhähne möglich. Da der MFM ein Gerät darstellt, welches nach dem thermischen Messprinzip (Basis: thermische Leitfähigkeiten, Wärmekapazitäten der Gase) arbeitet, hängt der gemessene Durchfluss von der Prozessgaszusammensetzung ab. Bei bekannter, konstanter Gaszusammensetzung ist eine Kalibrierung des Gerätes mit dem entsprechenden Gasgemisch möglich. Da dies im vorliegenden Anwendungsfall nicht gegeben ist, erfolgte eine werksseitige Kalibrierung der Geräte mit Argon. Um den tatsächlichen Volumenstrom an Prozessgas zu ermitteln, muss der zeitliche Verlauf der Gaszusammensetzung bekannt sein, deren Kenntnis eine Umrechnung des angezeigten Wertes mithilfe von sog. Sensorumrechnungsfaktoren (spezifischer Wert für jedes Gas) erlaubt. Nach dem MFM und einem Wattefilter befindet sich eine Gasprobenahmestelle. Über einen Kugelhahn kann Gas aus der Prozessgasleitung in ein Gasbag gefüllt werden, dessen Analyse anschließend an einem stationären Micro-Gaschromatographen erfolgt.

i. Steuer- und Regeleinrichtungen inkl. Prozessdatenerfassung:

Die Versuchsanlage ist mit einer EMSR-Anlage ausgestattet, die Sicherungs- als auch Regelungsaufgaben übernimmt. Wesentliche automatische Sicherheitseinrichtungen sind die automatische Notentspannung bei Erreichen eines definierten Grenzdruckes sowie der Übertemperaturschutz der Beheizungen. Beide Einrichtungen bewirken im Havariefall das Herunterfahren der Anlage in den Sicherheitszustand.

Die Regelungsaufgaben umfassen die Einstellung von definierten Zuständen nach Sollwerteingabe an der Bedienoberfläche der Prozesssoftware (s. Anhang B, Abb Anhang B-1). Die Regelgrößen sind dem Fließschema in Abbildung 3-6 zu entnehmen und umfassen im Großen und Ganzen die Spülgasströme, den Anlagendruck sowie die verschiedenen Temperaturen der Heizungen. Die Anlage verfügt weiterhin über eine Prozessdatenerfassung in Zeitintervallen von 1 bis 2 s, wobei alle Größen der aus dem Fließschema (s. Abbildung 3-6) zu entnehmenden Messstellen aufgezeichnet werden.

In Tabelle 3-12 sind die wesentlichen Charakteristika der Druckpyrolyseanlage nochmals abschließend zusammengefasst.

Tabelle 3-12: Charakteristika der Druckpyrolyseanlage (DPA)

Anlagenparameter	
Reaktorprinzip:	Fallrohr/Festbett
Volumen Vorratsbehälter:	1,0 l
Reaktorabmessungen:	
Durchmesser:	20 mm
nutzbare Länge:	1.700 mm
beheizte Länge:	1.100 mm
Max. Druck:	30 bar (Ü)
Gasatmosphäre:	Argon
Spülgasmenge:	max. 130 l/h (i.N.)
Spülasvorwärmtemperatur:	max. 400 °C
Gasmengenmessung:	2 Massendurchflussmesser (MFM) max. 1.500 bzw. 200 l/h (i.N.) Argon
Dosierung:	
Drehzahl Förderschnecke:	max. 11,5 U/min (stufenlos einstellbar)
Drehzahl Rührwerk:	max. 34 U/min (stufenlos einstellbar)
Massenstrom:	2…10 g/min
Beheizung:	elektrisch
Anzahl der Heizzonen:	5
Heizleistung:	je 1,5 kW (el)
Max. Temperatur:	800°C
Zusatzbeheizung:	Koksauffangbehälter bis max. 400 °C unterhalb/oberhalb Reaktionsrohr bis max. 450 °C
Kondensation:	3-stufig (baugleich) Kühlung über Umwälzkühler bis max. -20 °C mittels Ethylenglycol-/Wassergemisch Kondensationsgefäße mit metallischen Füllkörpern 3. Stufe beinhaltet Tetrahydrofuran als Lösungsmittel/ Bypassschaltung
Einsatzstoffparameter	
Rohstoffe:	Hackgut, Späne, Pellets (zerkleinert)
Korngröße:	0,2…0,5 mm
Max. Probenmenge:	200 g

3.2.5 Sonstige technische Ausrüstung

Für die Ermittlung des Pyrolysewärmebedarfs und die ergänzenden Untersuchungen zum Masseverlust in Abhängigkeit der Temperatur wurde auf vorhandene thermoanalytische Messgeräte (TG-DSC, HP-TGA) zurückgegriffen, deren Spezifika und die verwendeten Versuchsbedingungen in Tabelle 3-13 dargestellt sind. Schematische Abbildungen des Geräteaufbaus befinden sich in Anhang B (Abb Anhang B-2 und Abb Anhang B-3).

Tabelle 3-13: Anlagenspezifika der verwendeten thermoanalytischen Messgeräte und Versuchsbedingungen

	TG-DSC	HP-TG
Gerätecharakteristika		
Typ	Netzsch STA 409 C	DMT Hochdruck-TGA
Prinzip	Thermogravimetrie und Differential-Scanning-Calorimetrie (Wärmestrom-differenz-Kalorimeter)	Thermogravimetrie
Ergebnis	Masseabnahme in Abhängigkeit von der Temperatur und Wärmetönung des Prozesses	Masseabnahme in Abhängigkeit von der Temperatur
Probenträger	Pt-Al_2O_3	Incoloy-Drahtnetz
Versuchsbedingungen		
Temperatur	bis 1.400 °C	bis 1.000 °C
Druck	atmosphärisch	1, 10, 30 bar
Gasatmosphäre	Argon	Stickstoff
Spülgasmenge	100 ml/min	1, 2, 4 l/min (druckabhängig)
Aufheizrate	20 K/min	5, 10, 20 K/min
Probemenge	< 40 mg	< 1 g
Körnung der Probe	< 2 mm	< 2 mm

3.3 Stoffliche und energetische Bilanzierung des Pyrolyseprozesses

Ziel der Pyrolyseuntersuchungen ist die Erstellung geschlossener Stoff- und Energiebilanzen. Dazu sind die Pyrolyseprodukte bei den jeweiligen Versuchsbedingungen zunächst mengenmäßig zu erfassen und im Weiteren auf ihre Zusammensetzung hin zu analysieren. Die Bestimmung der Mengen an Koks und Kondensat sowie der eingesetzten Biomasse erfolgte gravimetrisch. Für das Pyrolysegas wurde zunächst das Volumen mittels Verdrängung einer gesättigten Salzlösung bei Raumtemperatur ermittelt und anschließend unter Verwendung der Gaszusammensetzung die Masse berechnet. Die detaillierte Vorgehensweise bei der Berechnung ist Anhang C zu entnehmen.

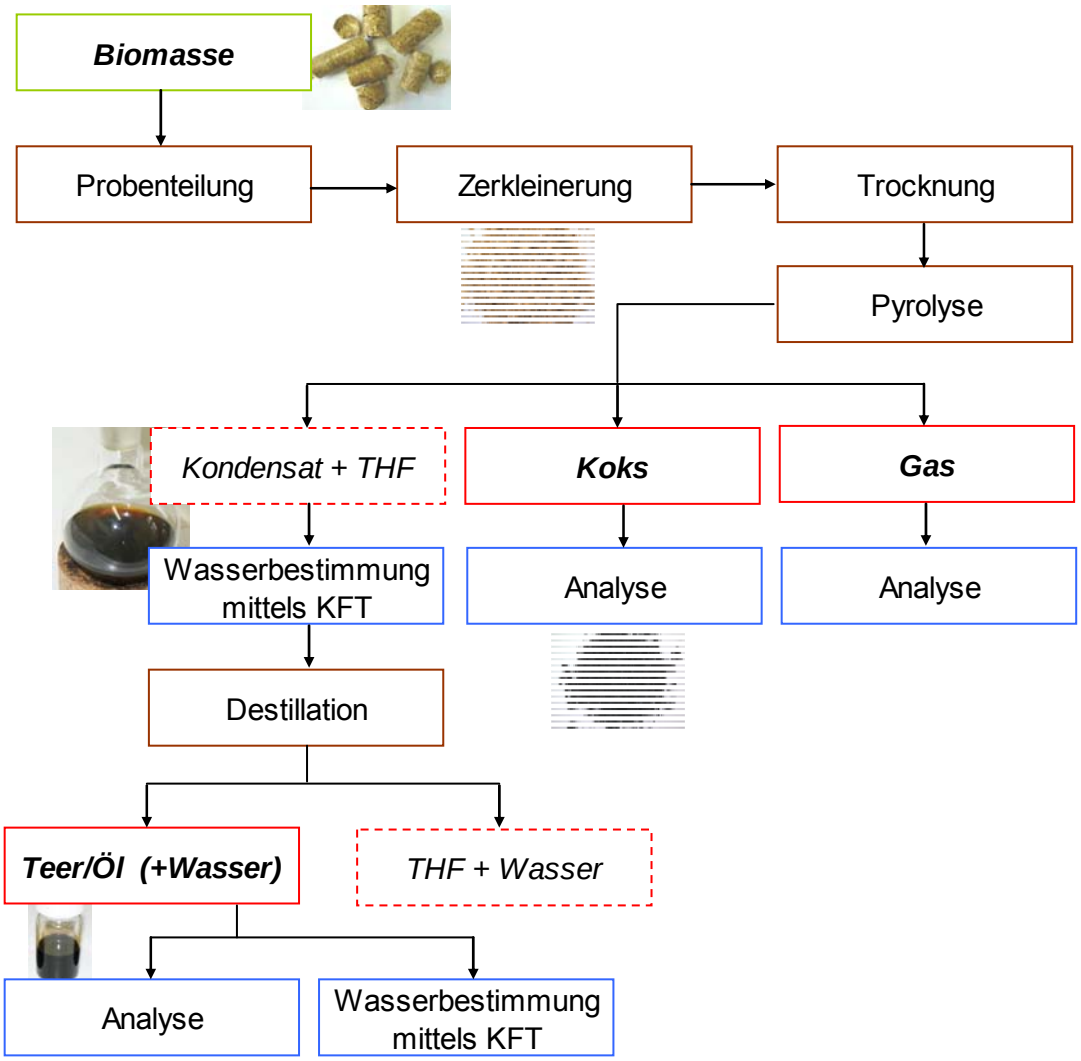


Abbildung 3-11: Schema zur Vorgehensweise bei der Rohstoffvorbereitung und der Analytik der Pyrolyseprodukte

Abbildung 3-11 zeigt schematisch die Vorgehensweise bei den Pyrolyseversuchen und der Produktanalytik. Infolge des Versuchsaufbaus fällt das Flüssigprodukt in Mischung mit einem Lösungsmittel (THF) an. Zur Ermittlung des Zersetzungswassergehaltes erfolgt zunächst eine Wasserbestimmung des Gemisches. Anschließend wird THF destillativ (atmosphärisch, bis 120 °C Sumpftemperatur) vom Kondensat getrennt. Dabei geht eine bestimmte Wassermenge mit ins Kopfprodukt über, was sich auf die spätere Teer/Öl-Analytik günstig auswirkt. Anschließend erfolgt eine weitere Wasserbestimmung des Teer/Öls.

Zur Bestimmung der Produktzusammensetzung wurden die folgenden Analysen durchgeführt:

- Pyrolysegas: Gaszusammensetzung mittels Gaschromatographie *(Modell: Agilent 3300, 3-Kanal-Micro-GC),*

  Brennwert-/Heizwertberechnung über die Mischungsregel aus der Gaszusammensetzung und den Brennwerten/Heizwerten der Gasbestandteile (siehe Anhang C),

- Koks: Brennwert/Heizwert nach DIN 51900-3, Elementaranalyse (C, H, N, S), Sauerstoff als Differenz, Analysenwasser nach DIN 51718, Aschegehalt nach DIN 51719 (bei 550 °C), Flüchtigengehalt nach DIN 51720, Fixer Kohlenstoff als Differenz;

- Kondensat: Wassergehalt mittels Karl-Fischer-Titration *(Titrino 732 der Fa. Metrohm, Lösungsmittel: Hydranal® KetoSolver, Reagenz: Hydranal® Composite 5k);*

  Anmerkung: Als Kondensat (bzw. Kondensat, gesamt) wird der unter Normbedingungen flüssig vorliegende Produktanteil bezeichnet. Er besteht aus den Produkten Zersetzungswasser und Teer/Öl und fällt infolge des Versuchsaufbaus als Mischung an. Die Ermittlung des Zersetzungswassergehaltes erfolgt über die Karl-Fischer-Titration, so dass Teer/Öl als wasserfrei betrachtet wird. Bei nicht getrockneten Einsatzstoffen findet sich zusätzlich die gesamte Gutfeuchte im Kondensat wieder.

- Teer/Öl: Elementaranalyse (C, H, N, S), Brennwert/Heizwert nach DIN 51900-3, Wassergehalt mittels Karl-Fischer-Titration *(Titrino 732 der Fa. Metrohm, Lösungsmittel: Hydranal® KetoSolver, Reagenz: Hydranal® Composite 5k).*

Die Analysen für Teer/Öl und Koks wurden als Doppelbestimmung durchgeführt, während die Wassergehaltsbestimmung über Karl-Fischer-Titration 5-fach erfolgte.

3.3.1 Stoffbilanzen

Die Bilanzierung des Pyrolyseprozesses erfolgt auf Basis des Masseerhaltungssatzes. Dieser ergibt sich für den Pyrolyseprozess nach Gleichung (3-1):

$$m_{BM} = m_{Koks} + m_{Gas} + m_{ZW} + m_{Öl} \qquad in\ g \tag{3-1}$$

Die Produkte Zersetzungswasser und Teer/Öl liegen bei Raumtemperatur flüssig vor. In der jeweiligen Versuchsapparatur fallen sie als Gemisch (Kondensat, gesamt) an. Daher ergibt sich nach Gleichung (3-2) :

$$m_{Kond} = m_{ZW} + m_{Öl} \qquad in\ g \tag{3-2}$$

Die Ausbeuten der einzelnen Pyrolyseprodukte berechnen sich aus dem Bezug der jeweiligen Masse an Produkt auf die eingesetzte Menge an Biomasse nach Gleichung (3-3):

$$A_{P,i} = \frac{m_{P,j}}{m_{BM}} \cdot 100\,\% \qquad in\ Ma.-\% \tag{3-3}$$

Die Bilanzierung der einzelnen Elemente erfolgt ebenfalls gemäß Masseerhaltungssatz. Gleichung (3-4) bzw. Gleichung (3-5) zeigen beispielhaft die Berechnungen für die Kohlenstoffbilanz.

$$m_{C,BM} = m_{C,Koks} + m_{C,Gas} + m_{C,ZW} + m_{C,Öl} \qquad in\ g \tag{3-4}$$

$$x_{C,BM} = x_{C,Koks} \cdot A_{Koks} + x_{C,Gas} \cdot A_{Gas} + x_{C,ZW} \cdot A_{ZW} + x_{C,Öl} \cdot A_{Öl} \qquad in\ kg_C\ /\ kg_{BM} \tag{3-5}$$

Die Bilanzen für Wasserstoff, Stickstoff, Schwefel, Sauerstoff und Asche ergeben sich analog. Bei den Berechnungen ist zwingend auf die Verwendung der Daten aus dem gleichen Bezugszustand (z. B. wasserfrei) zu achten.

Um Aussagen darüber treffen zu können bei welchen Versuchsbedingungen sich die in der Biomasse enthaltenen Elemente in den unterschiedlichen Produkten an- oder abreichern, ist die Berechnung der Elementeverteilung sinnvoll. Sie ist in Gleichung (3-6) am Beispiel der Kohlenstoffverteilung auf den Koks gezeigt. Für die anderen Produkte und Elemente ergibt sich die Berechnung analog.

$$C_{Koks} = \frac{x_{C,Koks} \cdot A_{Koks}}{x_{C,BM}} \cdot 100\,\% \qquad in\ \% \tag{3-6}$$

Für die vollständige Bilanzierung (Bilanzschluss) wurden weiterhin die nachfolgend dargestellten, zulässigen Annahmen getroffen:

- Die gesamte Brennstoffasche verbleibt im Koks. *Begründung:* Im untersuchten Temperaturbereich ist nicht mit einer Verflüchtigung von Aschebestandteilen zu rechnen. Ein experimenteller Nachweis konnte durch Bestimmung der Elementgehalte im Koks und dem Ausgangsstoff mittels Röntgenfluoreszenzanalyse erbracht werden.
- Das Pyrolysegas wird im Analysenzustand (bei der jeweiligen Raumtemperatur) als wasserdampfgesättigt betrachtet.
- Der Koks liegt im wasserfreien Zustand vor. Die bei der Analyse bestimmten Wassergehalte sind auf eine nachträgliche Wasseraufnahme bei der Aufbewahrung im Zeitraum zwischen Versuch und Analyse zurückzuführen.
- Die Ausbeuten an Zersetzungswasser und Teer/Öl werden über die Kohlenstoffbilanz (s. Gleichung (3-5)) neu berechnet. Dabei wird angenommen, dass der bei der Elementaranalyse des Teer/Öls ermittelte Kohlenstoffgehalt hinreichend genau ist. Mit den erhaltenen Ausbeuten wird anschließend die Elementarzusammensetzung (H, N, S, O) des Teer/Öls berechnet. Grund für diese Vorgehensweise ist, dass bei der experimentellen Bestimmung aller Ausbeuten und Zusammensetzungen sowie der Methodik bei der Produktgewinnung gewisse Fehler unvermeidbar sind. Diese Variante der Berechnung wurde ausgewählt, da bei der Bestimmung des Wassergehaltes im Kondensat, welcher für die Ermittlung der Ausbeute an Zersetzungswasser nötig ist, gewisse Probleme

infolge von ablaufenden Nebenreaktionen bei der Karl-Fischer-Titration auftraten. Die Bestimmung der Ausbeuten und Zusammensetzung von Koks und Gas werden hingegen als hinreichend genau angesehen.

3.3.2 Energiebilanzen

Im Rahmen des Projektes wurden Bilanzen für die chemisch gebundenen Energien bei der Pyrolyse verschiedener Rohstoffe erstellt. Dabei ergibt sich gemäß dem Energieerhaltungssatz die Gleichung (3-7) bzw. die Gleichung (3-8):

$$Q_{chem,BM} + Q_{Pyro} = Q_{chem,Koks} + Q_{chem,Gas} + Q_{chem,ZW} + Q_{chem,Öl} \qquad in\ kJ \qquad (3\text{-}7)$$

$$H_{O,BM} + q_{Pyro} = A_{Koks} \cdot H_{O,Koks} + A_{Gas} \cdot H_{O,Gas} + A_{ZW} \cdot H_{O,ZW} + A_{Öl} \cdot H_{O,Öl} \qquad in\ kJ / kg_{BM} \qquad (3\text{-}8)$$

Die Größe q_{Pyro} ist dabei die Reaktionsenthalpie bei der Pyrolyse und ergibt sich aus der Differenz der chemisch gebundenen Energien zwischen den Produkten und der Biomasse. Sie setzt sich aus der Summe der Reaktionsenthalpien aller ablaufenden Reaktionen zusammen. Je nachdem, ob endotherme oder exotherme Reaktionen den Pyrolyseverlauf dominieren kann q_{Pyro} positive oder negative Werte annehmen. Folglich ergibt sich bei:

- $q_{Pyro} > 0$, d. h. endotherme Reaktionen dominierend; Summe der chemisch gebundenen Energien der Produkte ist größer als die der Biomasse bzw.
- $q_{Pyro} < 0$, d. h. *exotherme Reaktionen* dominierend; Summe der chemisch gebundenen Energien der Produkte ist kleiner als die der Biomasse.

Bei den im Rahmen des Projektes erzielten Ergebnissen ist zu berücksichtigen, dass die Angaben für q_{Pyro} lediglich Trends für die Wärmetönung widerspiegeln, nicht aber die genauen Werte der Reaktionsenthalpie, da zu berücksichtigen ist, dass über die elektrische Beheizung der Versuchsanlagen Energie ins System eingetragen wurde.

Weiterhin kann auch für die in der Biomasse enthaltene chemisch gebundene Energie die Verteilung auf die Pyrolyseprodukte berechnet werden. Dies erfolgt gemäß Gleichung (3-9) am Beispiel für Koks. Für die Produkte Gas, Teer/Öl und Zersetzungswasser ergeben sich die Berechnungen analog.

$$q_{Koks} = \frac{A_{Koks} \cdot H_{O,Koks}}{H_{O,BM}} \cdot 100\ \% \qquad in\ \% \qquad (3\text{-}9)$$

Bei der Erstellung einer vollständigen Energiebilanz des Pyrolyseprozesses sind neben den chemisch gebundenen Energien auch die physikalisch gebundenen Wärmen, die dem Prozess von außen zugeführte Energie sowie die Verluste zu berücksichtigen (s. Gleichung (3-10)).

$$Q_{chem,BM} + Q_{phys,BM} + Q_{Pyro} + Q_{zu} = \sum_{n}^{i=1} Q_{chem,P,i} + \sum_{n}^{i=1} Q_{phys,P,i} + Q_V \qquad in\ kJ \qquad (3\text{-}10)$$

Für die im Rahmen des Projektes durchgeführten Versuche ist dies aufgrund fehlender Angaben zu den Verlusten der Anlage sowie der exakt zugeführten Leistung nicht möglich. Weiterhin ist die vorhandene Datenlage bezüglich der Wärmekapazitäten der Produkte Koks und Teer/Öl sowie der Verdampfungsenthalpien (Teer/Öl) unzureichend. Zudem ist zu berücksichtigen, dass insbesondere die Wärmekapazitäten des Feststoffes aufgrund der mit Fortschreiten des Pyrolyseprozesses ständigen stofflichen Veränderung nicht konstant bleiben.

3.4 Parametervariationen bei der Pyrolyse verschiedener Biomassen

Im Rahmen der Untersuchungen zum Pyrolyseverhalten verschiedener Biomassen wurden die folgenden Einflussgrößen betrachtet:

Verfahrenstechnische Einflussgrößen	*Rohstoffliche Einflussgrößen*
• Prozesstemperatur	• Brennstoffvorbereitung (Partikelgröße)
• Systemdruck	• Zusammensetzung (verschiedene Biomassen)
• Aufheizgeschwindigkeit	• Struktur (Pyrolyseverhalten der Biopolymere)
	• Biomassemischungen

Aus zeitlichen Gründen war die Abarbeitung eines statistischen Versuchsplanes zur Untersuchung des gesamten Parameterfeldes für jeden Einsatzstoff nicht möglich. Daher wurden mit Weizenstroh und Sägerestholz (Fichte, rindenfrei) zwei Referenzbrennstoffe definiert, um deren Pyrolyseverhalten in einem weiten Parameterbereich zu betrachten und die Versuchspläne für die anderen Rohstoffe auf Basis der erhaltenen Ergebnisse sinnvoll anzupassen.

Für die Untersuchungen in der Festbettpyrolyseapparatur wurden, wenn nicht anders angegeben, die auf eine Körnung von < 2 mm und bis zur Massekonstanz (105 °C im Trockenschrank) getrockneten Rohstoffe eingesetzt. Weiterhin wurden die Anlage so betrieben, dass der Röhrenofen auf eine Temperatur von 200 °C über der Zieltemperatur vorgeheizt und über den kalten Reaktor geschoben wurde (Ausnahme: Untersuchungen zum Einfluss der Aufheizgeschwindigkeit). Dies diente dem Erreichen einer möglichst hohen Aufheizrate für einen Festbettreaktor. Die Versuche liefen unter Atmosphärendruck mit einer konstanten Spülgasmenge (Argon) von 50 ml/min i.N. ab.

Untersuchungen zum Einfluss der Prozesstemperatur

Der Einfluss der Pyrolysetemperatur wurde im Bereich zwischen 200 bis 750 °C in der Festbettpyrolyseapparatur untersucht. Hierbei war es möglich ein breites Feld an Rohstoffen mit unterschiedlichen Eigenschaften einzusetzen:

- *Holzartige Biomasse:* Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276), Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472), Sägerestholz (Buche rindenfrei, 2309), Pappel (Kurzumtrieb, 2469),
- *Halmgutartige Biomasse:* Weizenstroh (2275), Weizenstroh (grau, 2297), Rapsstroh (2386), Landschaftspflegeheu (2480), Triticale-Ganzpflanze (2471)
- *Silierte Biomasse:* Maissilage (2475), Roggenganzpflanzensilage (2473), Grünschnittroggensilage (2474).

Für jeden Einsatzstoff konnten Pyrolysebilanzen für mindestens 5 Temperaturen erstellt werden. Insgesamt ergaben sich 151 Versuche. Ein detaillierter Versuchsplan befindet sich in Tab Anhang C-2 im Anhang C.

Untersuchungen zum Einfluss des Systemdrucks

Die Untersuchungen zum Einfluss des Systemdrucks im Bereich bis 30 bar (Ü) erfolgten in der Druckpyrolyseanlage mit den Referenzbrennstoffen Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2478) und Weizenstroh (2296) im Fallrohrbetrieb. Im Vergleich zu den Festbettversuchen wurde eine andere Charge des Sägerestholzes (2478) eingesetzt, die jedoch eine sehr ähnliche Zusammensetzung aufweist (s. Tabelle 3-4). Die eingesetzten Korngrößen betrugen 0,2 bis 0,5 mm. Die Limitierungen ergeben sich zum einen aus Schwierigkeiten mit dem Dosieraggregat (Abtrennung Feingutanteil < 0,2 mm) und zum anderen aus der Partikelaufheizung in Kombination mit der Umsatzrate. Vor den Versuchen erfolgte für beide Einsatzstoffe eine Trocknung bei 105 °C bis zur Massekonstanz. Tab Anhang C-3 in Anhang C gibt eine Übersicht der gewählten Parameter sowie der Anzahl der Untersuchungen bei der jeweiligen Parameterkombination.

Untersuchungen zum Einfluss der Aufheizgeschwindigkeit

Für die Untersuchungen zur Variation der Aufheizgeschwindigkeit diente ebenfalls die Festbettpyrolyseanlage. Somit ergeben sich auch hier atmosphärische Druckbedingungen. Zum Erreichen der Aufheizraten von 5 und 10 K/min konnte am Regler des Röhrenofens eine Rampe mit dem entsprechenden Wert vorgegeben werden. Bei 20 K/min war dies nicht nötig. Es erfolgte eine simultane Aufheizung von Ofen und Reaktor. Die Untersuchungen wurden für zwei verschiedene Pyrolysetemperaturen (400 und 500 °C) durchgeführt und dabei die folgenden Rohstoffe betrachtet:

- *Holzartige Biomasse:* Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276), Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472),
- *Halmgutartige Biomasse:* Weizenstroh (2275), Triticale-Ganzpflanze (2471)
- *Silierte Biomasse:* Maissilage (2475).

Eine Übersicht zu den gewählten Versuchsbedingungen gibt Tab Anhang C-4 im Anhang C.

Untersuchungen zum Einfluss der Feststoffverweilzeit bei Endtemperatur

Die Untersuchungen zum Einfluss der Feststoffverweilzeit bei Endtemperatur erfolgten in der Festbettpyrolyseanlage bei Schnellaufheizung für Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276). Es wurden 2 Temperaturen (380 °C und 550 °C) gewählt und die Verweilzeit jeweils mit 0, 10 und 30 min festgelegt.

Untersuchungen zum Einfluss der Brennstoffvorbereitung

Um Veränderungen der Brennstoffeigenschaften durch verschiedene Vorbereitungsmaßnahmen zu berücksichtigen wurden Pyrolyseversuche mit einer Variation der Partikelgröße vorgenommen. Die Untersuchungen erfolgten mit Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) in der Festbettpyrolyseanlage bei 500 °C (Schnellaufheizung) mit folgenden Körnungsklassen: < 1,25; 1,25-2; 2-3,15; 3,15-5 mm. Die Auswahl der verschiedenen Fraktionen erfolgte unter Berücksichtigung der apparatetechnischen Gegebenheiten der Festbettpyrolyseanlage. Hier ist die Korngröße aufgrund des geringen Reaktordurchmessers (20 mm) und der vorhandenen Einbauten (Schutzrohr des

Thermoelements, Gaszuführung) nach oben hin limitiert. Die Begrenzung nach unten ergibt sich aus der Gewährleistung der Durchströmbarkeit (Druckverlust) der Biomasseschüttung und der Minimierung des Materialaustrages infolge des Gasflusses im Bett von oben nach unten.

Untersuchungen zum Pyrolyseverhalten von Cellulose, Hemicellulose und Lignin

Der Versuchsplan für die Untersuchungen zum Pyrolyseverhalten konnte aus Verfügbarkeits- und Kostengründen nicht so umfangreich gestaltet werden wie ursprünglich angedacht. Xylan als Vertreter der Hemicellulosen ist nur in Verpackungseinheiten von max. 100 g zu Preisen von ca. 260 € im Chemikalienhandel (z. B. Sigma Aldrich) verfügbar. Cellulose konnte in Form eines handelsüblichen Zellstoffes auch in größeren Mengen beschafft werden. Der Versuch Lignin in größeren als den handelsüblichen Mengen von 500 g (Sigma Aldrich) zu erhalten, z. B. von verschiedenen skandinavischen Firmen, war immer an die Abgabe von Geheimhaltungsverpflichtungen und die Herausgabe der Forschungsergebnisse geknüpft, weswegen von dieser Option abgesehen wurde.

Dennoch waren die Untersuchungen zum Einfluss der Prozesstemperatur im Bereich zwischen 250 und 700 °C möglich (s. Tab Anhang C-2 im Anhang C). Da mit Ausnahme des Zellstoff alle Rohstoffe bei Anlieferung in Pulverform vorlagen, erfolgte, um die Vergleichbarkeit mit den Biomassen herzustellen eine Kompaktierung mit anschließender schonender Zerkleinerung auf eine Korngröße von < 2 mm. Die Proben wurden vor dem Einsatz bei 80 °C im Vakuumtrockenschrank bis zur Massekonstanz getrocknet.

Untersuchungen zum Pyrolyseverhalten von Biomassemischungen

Um herauszufinden, ob bei der Pyrolyse von Mischungen aus verschiedenen Biomassen gewisse Synergieeffekte auftreten, die ein abweichendes Verhalten von den über die einfache Anwendung der Mischungsregel berechneten Ausbeuten und Produktzusammensetzungen aufweisen, wurde auch dieser Aspekt in die Untersuchungen einbezogen. Dabei erfolgte eine Beschränkung auf Zweistoffgemische, wobei versucht wurde Biomassen mit unterschiedlichen Stoffgruppenzusammensetzungen zu wählen, um verschiedene Zersetzungsbereiche zu realisieren. Die Untersuchungen erfolgten bei 500 °C im Festbettreaktor mit Schnellaufheizung für folgende Rohstoffkombinationen:

- Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276)/Maissilage (2475),
- Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472)/Grünschnittroggensilage (2474) und
- Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472)/Weizenstroh (2275).

Es wurden die Mischungsverhältnisse 25/75, 50/50 und 75/25 (in Ma.-%) untersucht. Der Versuchsplan ist Tab Anhang C-5 im Anhang C zu entnehmen.

Thermogravimetrische Untersuchungen zum Druckeinfluss bei der Biomassepyrolyse

An der DMT-Hochdruckthermowaage wurden 42 Versuche zum Einfluss des Drucks und der Aufheizgeschwindigkeit auf die Pyrolyse verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen durchgeführt (s. Tab Anhang C-6 im Anhang C). Als Resultat der Untersuchungen liegen die Masseabnahme in Abhängigkeit der Temperatur bzw. der Zeit (TG-Kurve) und die Massenänderungsgeschwindigkeit (DTG-Kurve) bei der Umsetzung vor.

Untersuchungen zum Pyrolysewärmebedarf

Zur Gewinnung von Erkenntnissen bezüglich des Pyrolysewärmebedarfs für verschiedene Biomassen wurden 35 Versuche in einer Thermowaage mit Differenz-Wärmestrom-Kalorimeter (TG-DSC, Gerät: Netzsch STA 409 C) durchgeführt. Ein detaillierter Versuchsplan befindet sich in Tab Anhang C-7 im Anhang C. Vorher erfolgten systematische Untersuchungen zum Einfluss verschiedener Parameter wie Aufheizgeschwindigkeit, Partikelgröße, Einwaage und eines Deckels auf dem Tiegel auf die Reaktionsenthalpie bei der Zersetzung von Calciumoxalat (definierte Substanz) und der Pyrolyse von Weizenstroh. Die Wiederholbarkeit der Ergebnisse konnte durch Untersuchungen mit Calciumoxalat nachgewiesen werden.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Stoffliche und energetische Bilanzierung des Pyrolyseprozesses

In diesem Kapitel wird zunächst eine Auswahl der erzielten Ergebnisse zum Pyrolyseverhalten von Biomassen, den Biopolymeren (Cellulose, Hemicellulose, Lignin) und den Biomassemischungen in Abhängigkeit von den Verfahrensparametern Temperatur, Druck, Aufheizgeschwindigkeit und Haltezeit sowie der Brennstoffvorbereitung gegeben. Auf eine vollständige Darstellung aller erhaltenen Ergebnisse wird an dieser Stelle verzichtet, da dies vor dem Hintergrund, dass sich in Abhängigkeit der Prozessparameter ähnliche Trends für verschiedene Einsatzstoffe ergeben, nicht zweckmäßig erscheint. Weiterhin können die gewonnenen Daten zu Pyrolyseproduktverteilungen und -zusammensetzungen dem Anhang sowie der erstellten Datenbank (MS-Access) entnommen werden.

4.1.1 Wiederholbarkeit der Versuchsergebnisse

Um die Wiederholbarkeit der Versuchsergebnisse für die Laborpyrolyseanlage zu demonstrieren wurden für die Referenzbrennstoffe bei einer mittleren Temperatur von 500 °C mehrere Untersuchungen in unterschiedlichen Zeiträumen durchgeführt. Aus den Mittelwerten und Standardabweichungen der jeweiligen Versuchsreihen konnten relative Standardabweichungen für Ausbeuten, Zusammensetzungen und Energieinhalte berechnet werden. Die maximale Abweichung für jeden Wert aus den Untersuchungen wurde als Fehler definiert (s. Tabelle 4-1, Tabelle 4-2). Zusätzlich konnten für diverse Parameterkombinationen Doppelversuche erfolgen, die im Weiteren die Belastbarkeit der Daten gewährleisten.

Tabelle 4-1: Relative Standardabweichungen der Produktausbeuten

Angaben in %	MIN	MAX
Koks	1,2	1,4
Kondensat	0,7	1,4
Teer/Öl	0,6	4,4
Zersetzungswasser	1,7	6,2
Gas	3,3	3,6

Die Größenordnungen der relativen Standardabweichungen für die Ausbeuten der Pyrolyseprodukte im Bereich bis max. 6,2 % sind für die experimentelle Versuchsdurchführung als sehr gut einzustufen. Die Immediatanalyse des Kokses sowie die Elementarzusammensetzungen der drei Produkte (Ausnahme: Schwefel, verbrennlich) weisen mit max. 12 % ebenfalls gute Werte auf. Die Bestimmung des Gehaltes an verbrennlichem Schwefel gestaltete sich aufgrund der geringen vorkommenden Anteile in den Biomassen und der Nachweisgrenze des verwendeten Gerätes als schwierig und weist dementsprechend große Fehler auf. Eine Beurteilung von Trends in Abhängigkeit verschiedener Pyrolysebedingungen wird damit unmöglich.

Tabelle 4-2: Relative Standardabweichungen der Produktzusammensetzungen und Energieinhalte

Angaben in %	Koks		Pyrolysegas		Teer/Öl	
	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX
Asche	1,3	1,5	-	-	-	-
Flüchtige Bestandteile	2,7	5,6	-	-	-	-
Fixer Kohlenstoff	0,9	1,4	-	-	-	-
Kohlenstoff	0,4	0,4	0,4	6,9	0,7	4,9
Wasserstoff	1,4	1,8	2,7	10,0	3,1	10,9
Stickstoff	6,0	9,6	-	-	2,3	6,0
Schwefel, verbrennlich	-	33,2	87,0	102,8	9,0	21,9
Sauerstoff	2,1	4,7	0,3	0,9	1,4	11,9
O+SC	2,1	4,7	0,3	0,9	1,5	11,7
Brennwert	0,1	1,0	1,7	4,9	2,5	7,1
Heizwert	0,2	1,1	1,7	4,8	2,3	7,1

Größere Abweichungen treten weiterhin bei der Gasanalytik im Bereich der Schwefel- und Kohlenwasserstoffkomponenten ab C3 auf (s. Tabelle 4-3). Dort liegen die Messwerte häufig in der Region der Nachweisgrenzen des Micro-GC, so dass sich eine Bewertung der Ergebnisse u. U. als schwierig erweist. Die Hauptgaskomponenten CO, CO_2, CH_4 sowie Ethan und Ethen zeigen mit maximalen Fehlern von 11,8 % eine gute Wiederholbarkeit. Etwas größer sind die Abweichungen bei Wasserstoff, da auch hier insbesondere bei niedrigeren Temperaturen (bis 500 °C) nur geringe Konzentrationen im Gas feststellbar waren.

Tabelle 4-3: Relative Standardabweichungen der Pyrolysegaszusammensetzung und der Ausbeuten der Gaskomponenten

Angaben in %	Gaszusammensetzung		Gasausbeuten	
	MIN	MAX	MIN	MAX
H2	5,4	13,3	7,1	15,3
Methan	2,3	6,8	3,4	8,2
CO	1,6	4,0	1,5	4,3
CO2	1,7	1,8	3,8	4,6
Ethin	-	-	-	-
H2S	70,7	106,2	70,7	108,2
COS	116,7	116,7	118,0	118,0
Propin	8,6	88,6	10,8	89,2
Ethan	5,0	10,6	7,7	11,8
Ethen	4,5	8,2	7,1	8,5
Propan	16,8	28,2	18,7	30,0
Propen	165,8	165,8	165,1	165,1
i-Butan	66,3	78,6	67,9	78,7
N-Butan	141,4	204,5	141,4	203,6
Summe	-	-	3,0	3,5

Abschließend kann festgestellt werden, dass die Wiederholbarkeit der Ergebnisse an der Laborpyrolyseanlage gegeben ist. Für die Bewertung der Trends in Abhängigkeit von den Pyrolysebedingungen werden die maximalen relativen Standardabweichungen herangezogen. Effekte, die innerhalb des einfachen Fehlerintervalls auftreten, können somit nicht als signifikanter Einfluss bewertet werden.

4.1.2 Einfluss der Prozesstemperatur

Die Temperatur stellt die wichtigste Einflussgröße bei der Pyrolyse von Biomasse dar. Die bei der Zersetzung ablaufenden Reaktionen finden in verschiedenen Temperaturbereichen statt. Mit steigender Temperatur schreitet die Zersetzung der ursprünglichen Biomasse immer weiter fort, weswegen es zu einer Änderung der Ausbeuten, Produktzusammensetzung und des Energieinhaltes der Produkte kommt.

In Abhängigkeit der Pyrolysetemperatur zeigen die untersuchten biogenen Rohstoffe ein ähnliches Verhalten, das in der Literatur bestätigt wird. Daher wird der Einfluss der Pyrolysetemperatur auf das Zersetzungsverhalten nachfolgend exemplarisch anhand der Referenz Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) dargestellt. Die detaillierten Ergebnisse aller Biomassen sind Anhang D zu entnehmen.

Eine optische Begutachtung des Feststoffes vor und nach der Pyrolyse bei verschiedenen Temperaturen zeigt, dass die Struktur der Partikel weitestgehend erhalten bleibt. Infolge der fortschreitenden thermischen Zersetzung ergibt sich jedoch eine Farbänderung über dunkelbraun (oberflächige Pyrolysereaktionen) bis hin zu schwarz (verkohltes Ausgangsmaterial, ab ca. 400 °C).

Abbildung 4-1: Veränderungen des Feststoffes bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte, rindenfrei) in Abhängigkeit von der Temperatur bei Schnellaufheizung

Produktverteilung

Abbildung 4-2 zeigt die Produktverteilung für die Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte, rindenfrei) in Abhängigkeit von der erreichten Maximaltemperatur bei Schnellaufheizung. Es ist ersichtlich, dass die Koksausbeute mit steigender Temperatur abnimmt und die Ausbeuten an Gas sowie Kondensat zunehmen. Dabei fallen insbesondere bei Koks zwei Zersetzungsbereiche auf. Im Temperaturbereich zwischen 300 und 420 °C kommt es zu einer deutlichen Masseabnahme des Feststoffes, wogegen im weiteren Verlauf bis 600 °C die Koksausbeute wesentlich langsamer abnimmt und sich schließlich auf einen annähernd konstanten Wert einstellt. Bis dahin sind bereits ca. 92 % des im Holz enthaltenen Flüchtigenanteils entbunden. Dass diese zweistufige Masseabnahme für die Pyrolyse von Biomassen charakteristisch ist, zeigen auch die thermogravimetrischen Untersuchungen (s. Kapitel 4.3.3, S. 130).

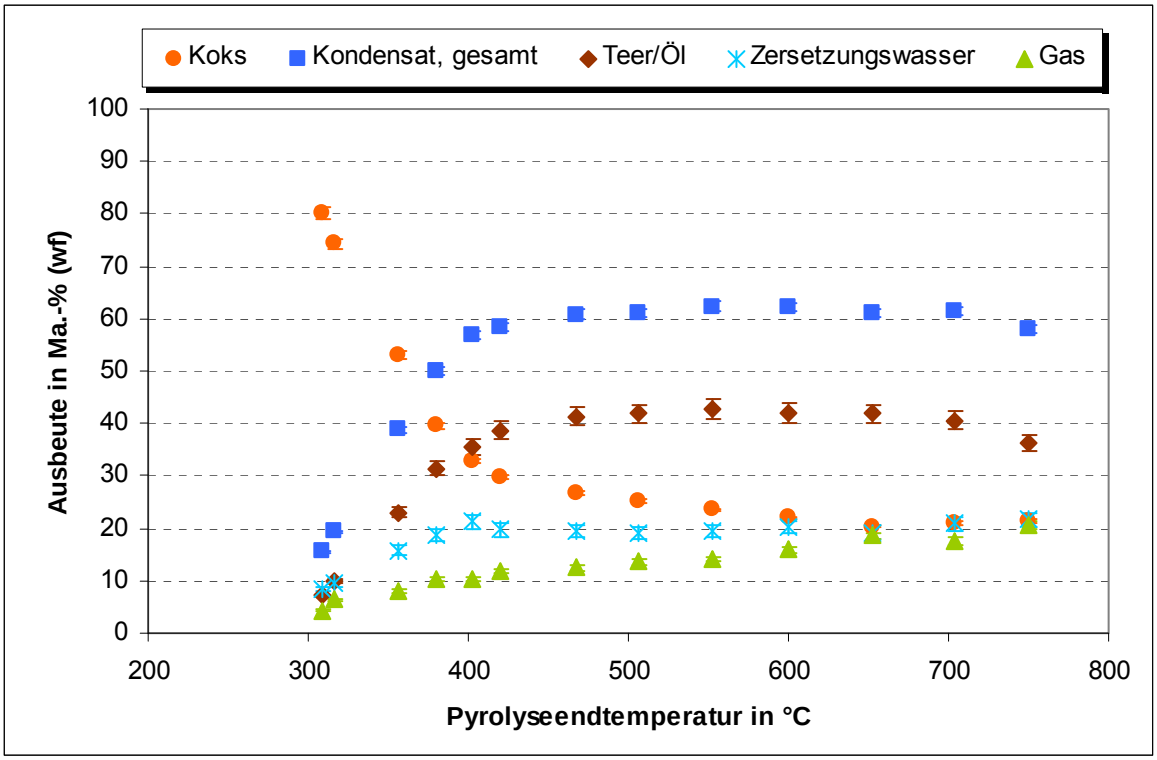


Abbildung 4-2: **Einfluss der Endtemperatur auf die Produktausbeuten bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)**

Die Kondensatausbeute steigt im Bereich bis 420 °C stark an und bleibt anschließend annähernd unverändert. Eine leichte Abnahme an Flüssigprodukt ist zwischen 700 und 750 °C zu verzeichnen, die wahrscheinlich mit sekundären Crackreaktionen verbunden ist, da auch die Gasausbeute in diesem Bereich ansteigt. Das in der Literatur beschriebene charakteristische Maximum in der Kondensatausbeute im Temperaturbereich zwischen 450 und 600 °C (z. B. /DiBlasi2000/, /Demirbas2006/) konnte bei den untersuchten Biomassen nicht oder nur sehr gering ausgeprägt festgestellt werden. Die Ursache dafür ist sehr wahrscheinlich in den gewählten Versuchsbedingungen mit zügiger Aufheizung des Feststoffes und ständiger Durchströmung des zu pyrolysierenden Gutes mit Argon zu suchen. Die flüchtigen Bestandteile werden sehr schnell freigesetzt und mit dem Inertgasstrom abtransportiert, so dass die Verweilzeit der Kohlenwasserstoffverbindungen in der heißen Zone sehr kurz ist und somit das Eintreten von sekundären Pyrolysereaktionen weitgehend verhindert wird. Letztgenannte treten insbesondere bei Temperaturen ab 500 °C auf und bewirken das Cracken von größeren Kohlenwasserstoffmolekülen in kurzkettigere Verbindungen und Gase wie Wasserstoff, Methan oder auch Ethan.

Die Gasausbeute steigt über den gesamten untersuchten Temperaturbereich relativ kontinuierlich an. Die holzartigen Biomassen zeigen im Bereich zwischen 400 und 500 °C (genauer Temperaturbereich schwankt für die verschiedenen Holzsorten) eine Plateauphase ohne signifikante Veränderungen der Gasausbeute (s. Abbildung 4-2).

Die zweite Zersetzungsphase des Feststoffes ist fast ausschließlich mit der Entbindung von gasförmigen Pyrolyseprodukten verbunden, da die Freisetzung der Hauptmenge der kondensierbaren Komponenten bereits vorher abgeschlossen ist.

Die Teer/Öl-Ausbeute verhält sich analog zu der des Gesamtkondensats, d. h. es ergibt sich von Pyrolysebeginn bis etwa 400 °C ein starker Anstieg, der anschließend entweder in eine Plateauphase übergeht oder nach Durchlaufen eines wenig ausgeprägten Maximums leicht abfällt. Zersetzungswasser nimmt bis 400 °C stärker und anschließend nur noch mäßig bis gar nicht zu. Die Datenlage in der Literatur bezüglich der Zersetzungswassergehalte ist gering. Es existieren lediglich diverse Untersuchungen zur Pyrolyse von Cellulose und Glucose, die diesen Sachverhalt betrachten und entsprechende Reaktionsmechanismen postulieren z. B. von /Prey1977/.

Pyrolysegaszusammensetzung

Kohlenmonoxid und Kohlendioxid als Primärprodukte der Pyrolyse stellen mit 66 bis 100 Vol.-% die Hauptkomponenten im Gas dar (s. Abbildung 4-3). Ihre Entstehung ist im Wesentlichen auf Decarboxylierungs- und Decarbonylierungsreaktionen der organischen Matrix zurückzuführen. Die Ausbeuten an CO und CO_2 steigen mit fortschreitender Zersetzung der Biomasse an. Dabei ergeben sich für verschiedene Biomassen teilweise unterschiedliche Verläufe. Das Sägerestholz (Fichte, rindenfrei) zeigt zwischen 400 und 600 °C einen eher geringen Anstieg an CO_2, ähnliches ergibt sich bei Weizenstroh für CO und CO_2. Es liegt nahe, dass die unterschiedlichen Verläufe bei der Freisetzung im Wesentlichen auf die Struktur der Einsatzstoffe (Gehalte, Struktur des enthaltenen Lignins, der Hemicellulose und der Cellulose) zurückzuführen sind. Derartige Abhängigkeiten werden in Kapitel 4.1.8 (S. 101) näher betrachtet.

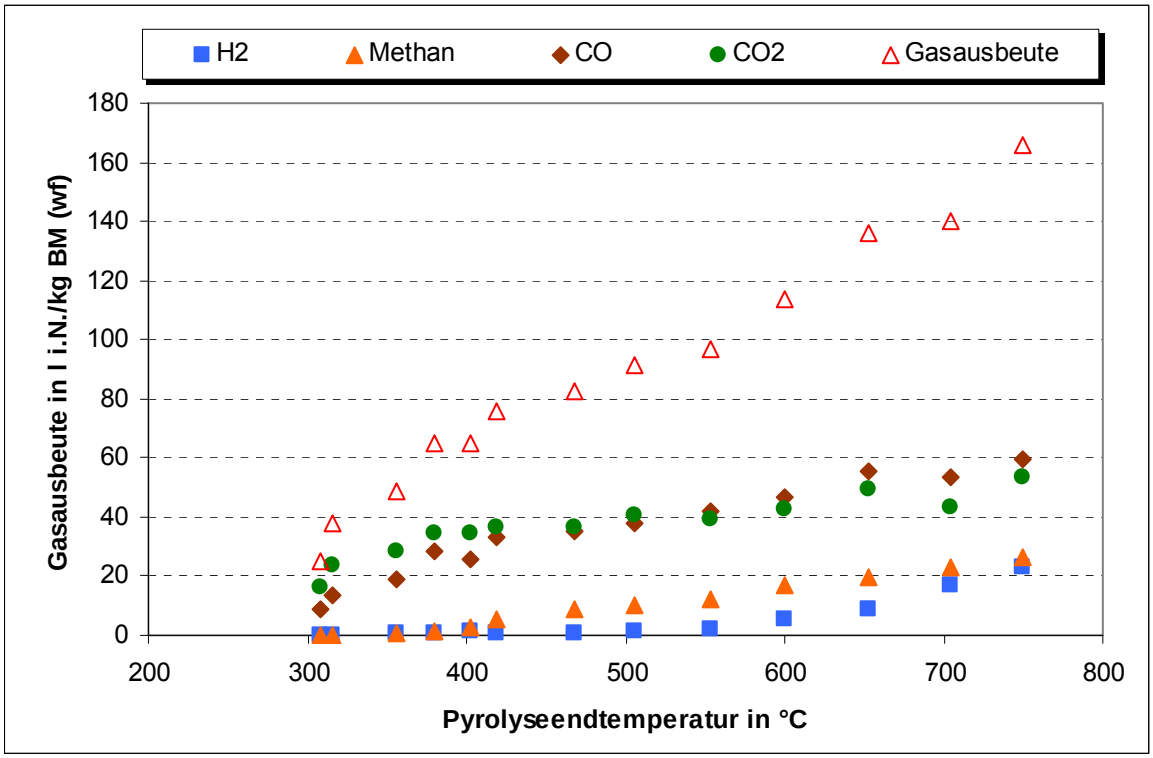


Abbildung 4-3: **Ausbeuten der Hauptgaskomponenten in Abhängigkeit von der Temperatur bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte, rindenfrei) im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)**

Neben CO und CO_2 sind im Pyrolysegas auch Methan, Wasserstoff und andere niedermolekulare Kohlenwasserstoffe (C2 bis C4) sowie Spuren schwefelhaltiger Komponenten (H_2S, COS) enthalten. Bei steigender Pyrolysetemperatur kommt es zu einer Zunahme der Ausbeute an Wasserstoff (s. Abbildung 4-3) und niedermolekularen Koh-

lenwasserstoffen (CH_4: s. Abbildung 4-3; C2, C3: s. Abbildung 4-4). Der Grund für diesen Trend liegt im Fortschreiten der pyrolytischen Zersetzung des Feststoffes (Methylgruppenabspaltung ⇨ CH_4; Ringkondensation ⇨ H_2) und oberhalb von 500 °C mitunter auch an auftretenden sekundären Crackreaktionen der flüchtigen Kohlenwasserstoffe.

Die sich zeigenden Trends (Ansteigen mit zunehmender Pyrolysetemperatur) für die Freisetzung von C2- und C3-Kohlenwasserstoffen sind signifikant, wenngleich die Werte gewissen Schwankungen im Rahmen des insbesondere bei Propan und Propen größeren Fehlerintervalls unterliegen. Auf die Darstellung der Schwefelkomponenten sowie der C4-Kohlenwasserstoffe wird im Weiteren verzichtet, da sie nur in Spuren auftreten und eine Ableitung von signifikanten Trends nicht möglich ist.

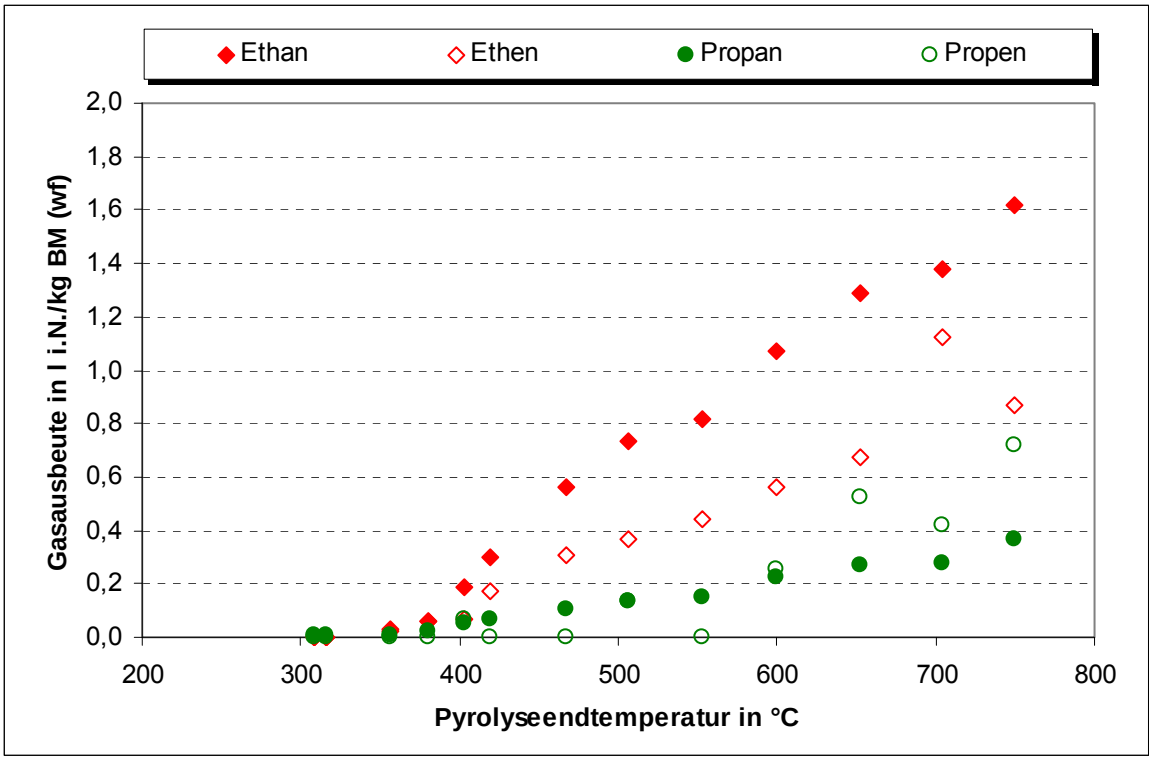


Abbildung 4-4: **Ausbeuten der C2- und C3-Kohlenwasserstoffe im Gas in Abhängigkeit von der Temperatur bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte, rindenfrei) im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)**

Die Entbindung der Gaskomponenten Methan, Wasserstoff, Ethan, Ethen, Propan und Propen in Abhängigkeit der Pyrolysetemperatur verhält sich für alle untersuchten Biomassen analog. Unterschiede treten aber in der Höhe der Ausbeuten auf.

Kokszusammensetzung

Da sich die gesamte Brennstoffasche im Koks anreichert, nimmt der Aschegehalt mit steigender Temperatur zu. Das rindenfreie Sägerestholz weist mit 0,33 Ma.-% (wf) jedoch sehr geringe Anteile auf, was dazu führt, dass im Koks maximal 1,6 Ma.-% (wf) Asche zu finden sind. Bei den landwirtschaftlichen Biomassen wie Weizenstroh und den Silagen sind die Gehalte entsprechend höher, was dazu führt, dass u. U. bis zu einem Drittel des Kokses aus mineralischen Komponenten besteht. Im Zuge der fortschreitenden Zersetzung der Biomasse und der damit verbundenen Freisetzung flüchtiger Bestandteile kommt es im Feststoff zur Steigerung des Anteils an fixem Kohlenstoff und zur Verarmung an flüchtigen Stoffen (s. Abbildung 4-5). In der Hauptphase

der Zersetzung zwischen 300 und 400 °C ist eine Zunahme des Gehaltes an fixem Kohlenstoff von +45 Ma.-% (wf) festzustellen. Danach flacht der Anstieg deutlich ab. Bei einer Pyrolysetemperatur von 750 °C wird mit 91,5 Ma.-% (wf) der höchste Wert erreicht. Der Anteil an flüchtigen Komponenten ist bis dahin auf 7 Ma.-% (wf) zurückgegangen.

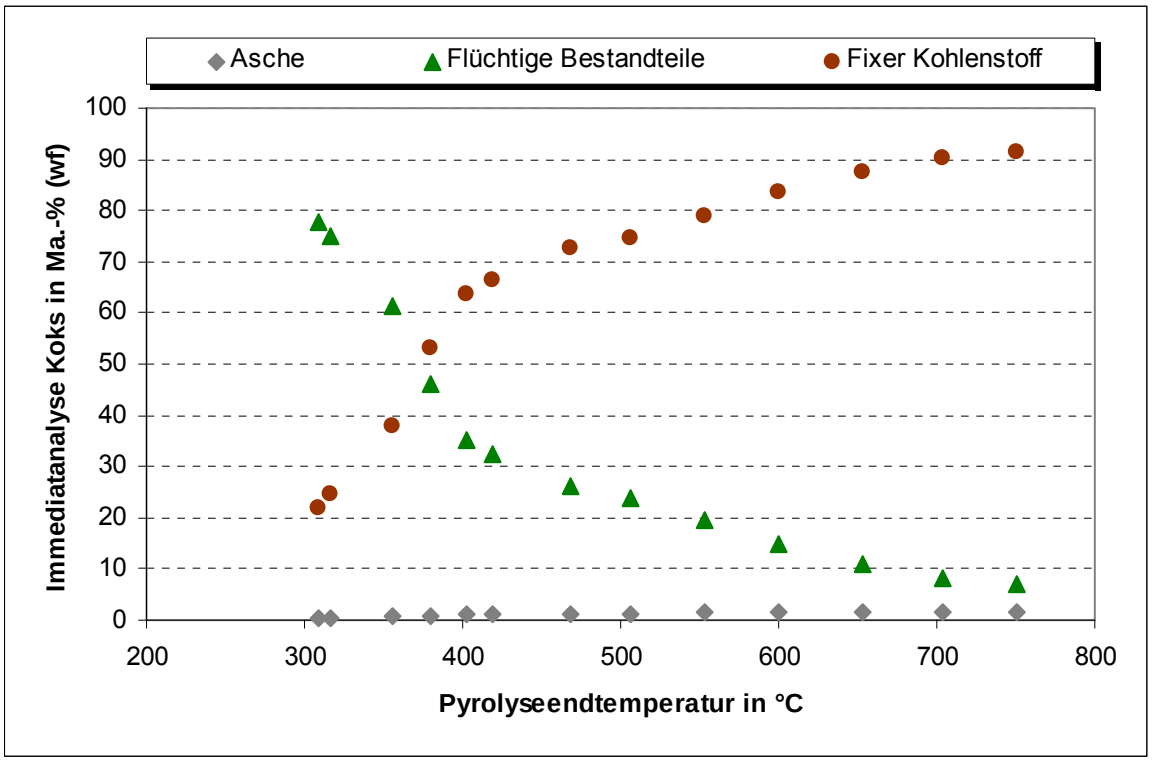


Abbildung 4-5: **Immediatanalyse des Kokses in Abhängigkeit von der Temperatur bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte, rindenfrei) im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)**

Auch in der Elementarzusammensetzung des Kokses spiegeln sich die zwei Phasen der Zersetzung wider. Ausgehend von 50,7 Ma.-% (wf) Kohlenstoff im Einsatzstoff kommt es bis 400 °C zu einer Anreicherung auf 80 Ma.-% (wf). Gleichzeitig nehmen sowohl Sauerstoff- als auch Wasserstoffgehalt infolge der zunehmenden Entbindung von flüchtigen Kohlenwasserstoffen und sauerstoffhaltigen Gaskomponenten wie CO und CO_2 mit steigender Pyrolysetemperatur ab. Bei 750 °C setzt sich der entstehende Koks wie folgt zusammen: C 93,5; H 1,9; N 0,3 und O(+S_C) 2,9 Ma.-% (wf). Beim Stickstoff kommt es ebenfalls zu einer Anreicherung im Feststoff.

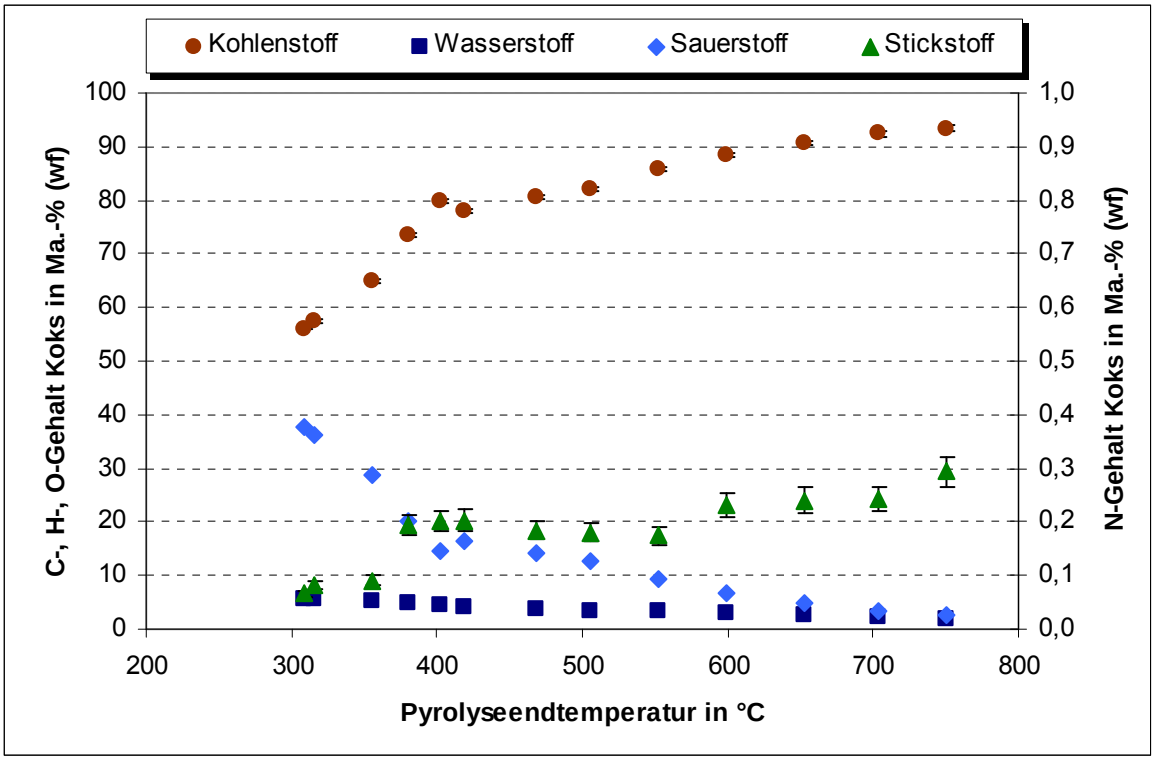


Abbildung 4-6: **Elementarzusammensetzung des Kokses in Abhängigkeit von der Temperatur bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte, rindenfrei) im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)**

Teer/Öl-Zusammensetzung

Die Zusammensetzung der organischen, kondensierbaren Kohlenwasserstoffe (s. Abbildung 4-7) verändert sich über den untersuchten Temperaturbereich kaum. Lediglich in der Hauptphase der Zersetzung zwischen 300 und 400 °C kommt es zu einem leichten Anstieg im Sauerstoffgehalt, wogegen der Anteil an Stickstoff abnimmt. Die Veränderungen in dieser Phase sind darauf zurückzuführen, dass bis dahin nur ein Teil der flüchtigen Stoffe entbunden ist und zwar die, deren Abspaltung infolge niedrigerer Bindungsenergien begünstigt ist. Bei einer Pyrolysetemperatur von 400 °C ist die Freisetzung der Teere/Öle abgeschlossen. Da auch bei höherer Pyrolysetemperatur die Entbindung der Hauptmenge der Teere/Öle in diesem Bereich (bis 400 C°) erfolgt und durch die schnelle Abführung aus der Reaktionszone das Auftreten von Sekundärreaktionen minimiert wird, ändert sich die Elementarzusammensetzung kaum. Lediglich bei 750 °C kommt es zu einem leichten Anstieg bei Kohlenstoff, Wasserstoff und Stickstoff, wogegen Sauerstoff leicht abfällt. Da hier die Aufheizzeit relativ kurz ist, ist es wahrscheinlich, dass ein Teil der Teere/Öle mit einer höheren Temperatur (>500 °C) in Kontakt kam und somit sekundäre Spaltreaktionen auftraten (s. Produktverteilung Abbildung 4-2).

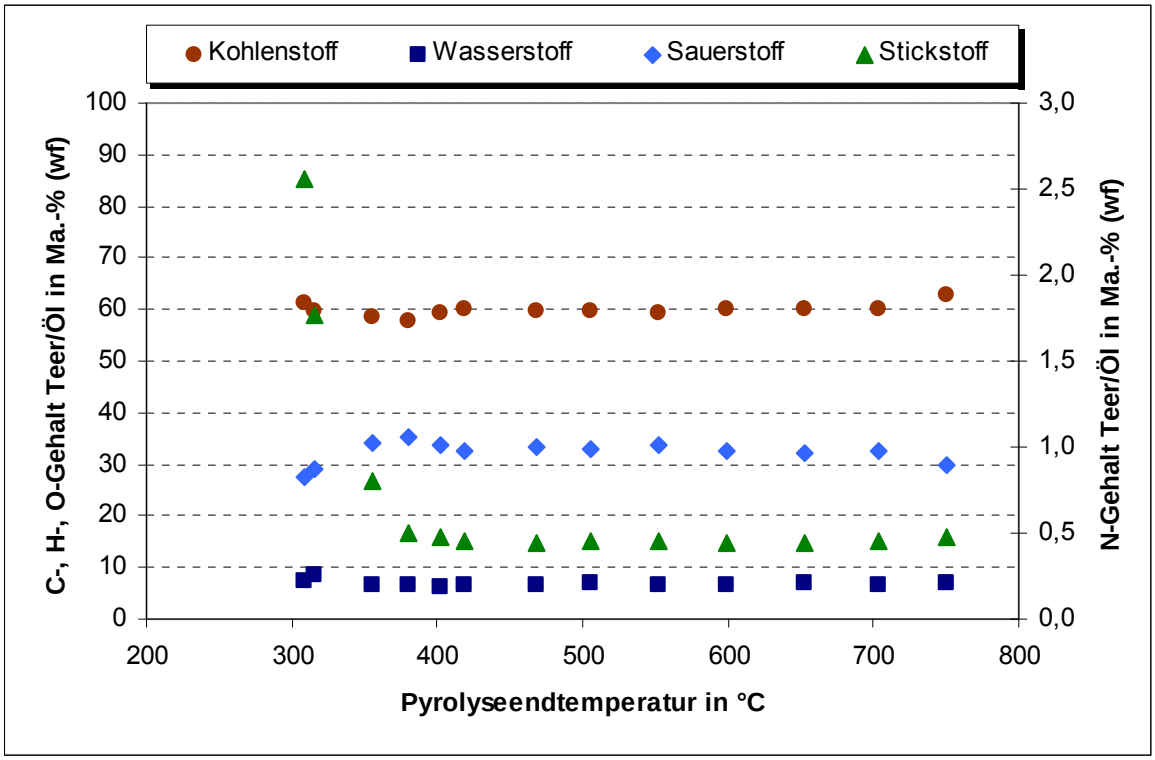


Abbildung 4-7: **Elementarzusammensetzung Teer/Öl in Abhängigkeit von der Temperatur bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte, rindenfrei) im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)**

Elementeverteilung

Aus den Ausbeuten der Pyrolyseprodukte und den jeweiligen Zusammensetzung lässt sich die prozentuale Verteilung der im Einsatzmaterial enthaltenen Elemente auf die Pyrolyseprodukte berechnen. Abbildung 4-8 zeigt beispielhaft die Sauerstoffverteilung bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) in Abhängigkeit der Temperatur. Die Hauptmenge des im Einsatzstoff gebundenen Sauerstoffs wird in Form von Zersetzungswasser freigesetzt (~40…45 %). Im Teer/Öl steigt die Sauerstoffeinbindung mit zunehmender Temperatur (bis ca. 650 °C) infolge der Abspaltung von sauerstoffhaltigen Bruchstücken aus der organischen Matrix. Dies können Aldehyde, Ketone, Carbonsäuren und Zuckermonomere, welche überwiegend aus der Zersetzung von Hemicellulose sowie Cellulosen stammen, oder phenolische Bruchstücke (Ligninspaltung) sein. Nach Ende der Hauptphase der Zersetzung liegen die Werte für die Sauerstoffeinbindung in das organische Flüssigprodukt zwischen 25 und 33 %. Auch im Pyrolysegas geht mit einer Temperaturerhöhung ein Anstieg der Sauerstoffeinbindung einher, was aus der zunehmenden Freisetzung von CO und CO_2 resultiert. Die Werte steigen dabei relativ kontinuierlich bis auf 28,2 % bei 700 °C. Während sich Sauerstoff in den flüchtigen Bestandteilen anreichert, verarmt die Feststoffmatrix zunehmend an diesem Element (< 5 % ab 600 °C).

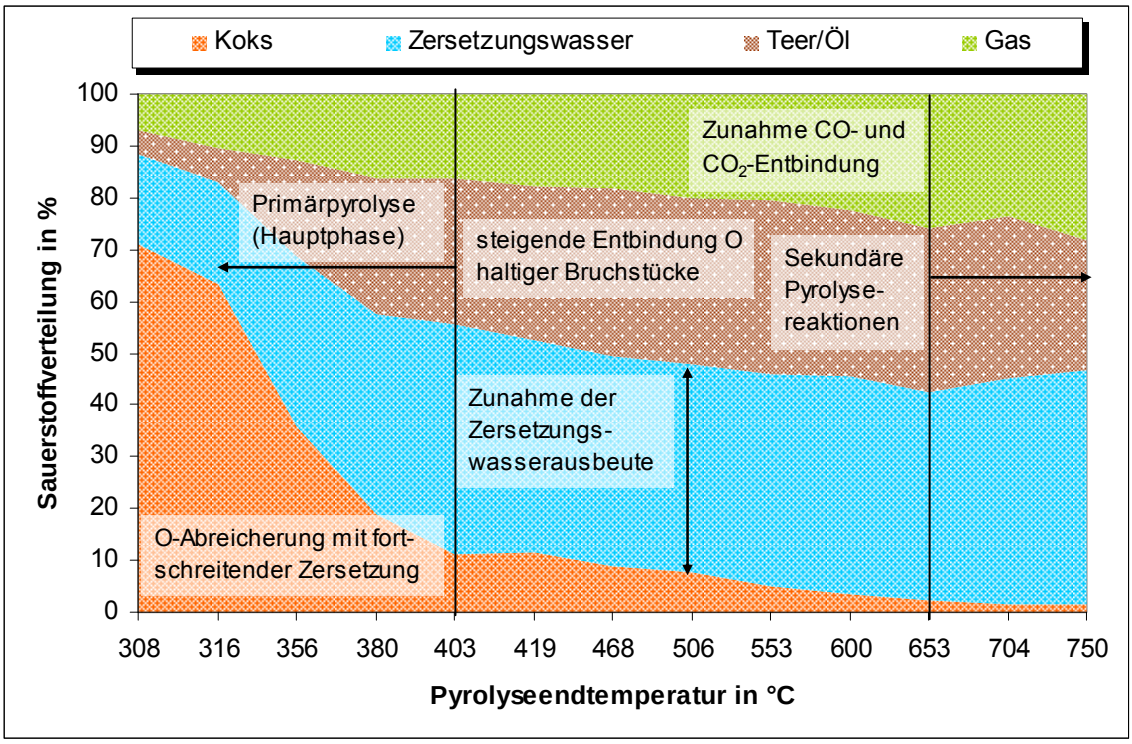


Abbildung 4-8: **Verteilung der im Einsatzstoff enthaltenen Elemente auf die Pyrolyseprodukte in Abhängigkeit von der Temperatur bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)**

Derartige Werte lassen sich auch für die chemisch gebundene Energie des Einsatzstoffes auf Basis der Produktbrennwerte und der Ausbeuten berechnen.

Chemisch gebundene Energie der Pyrolyseprodukte

Für eine energetische Nutzung der einzelnen Pyrolyseprodukte Koks, Gas und Kondensat (Teer/Öl + Zersetzungswasser) ist die darin chemisch gebundene Energie eine entscheidende Größe. Je nach gewünschtem Zielprodukt und entsprechender Prozessführung können die anderen Pyrolyseprodukte zur teilweisen oder vollständigen Deckung des Wärmebedarfs genutzt werden. Für die Optimierung der Biomasselogistik bei zentraler Nutzung der Biomasse ist die Erhöhung der Energiedichte durch die Pyrolyse ebenfalls von Interesse. Daher werden nachfolgend die Brennwerte der Pyrolyseprodukte sowie die Verteilung der chemisch gebundenen Energie der Ausgangsbiomasse auf Koks, Gas und Kondensat in Abhängigkeit von den Prozessbedingungen betrachtet.

Der Energieinhalt hängt im Wesentlichen von der Zusammensetzung der Produkte ab, so steigen Brenn- und Heizwert mit steigendem Kohlenstoff- und sinkendem Sauerstoffgehalt. Der Koks weist daher Brennwerte zwischen ~22.500 bei 300 °C und ~33.800 kJ/kg (wf) bei 750 °C Pyrolysetemperatur auf, wohingegen die Werte bei Teer/Öl im Bereich um 27.000 kJ/kg (wf) schwanken. Im Pyrolysegas erfolgt ein Anstieg von 2.600 auf 11.300 kJ/kg (wf) infolge der vermehrten Entbindung energiereicher Verbindungen wie Methan, Wasserstoff und C2- sowie C3-Kohlenwasserstoffe.

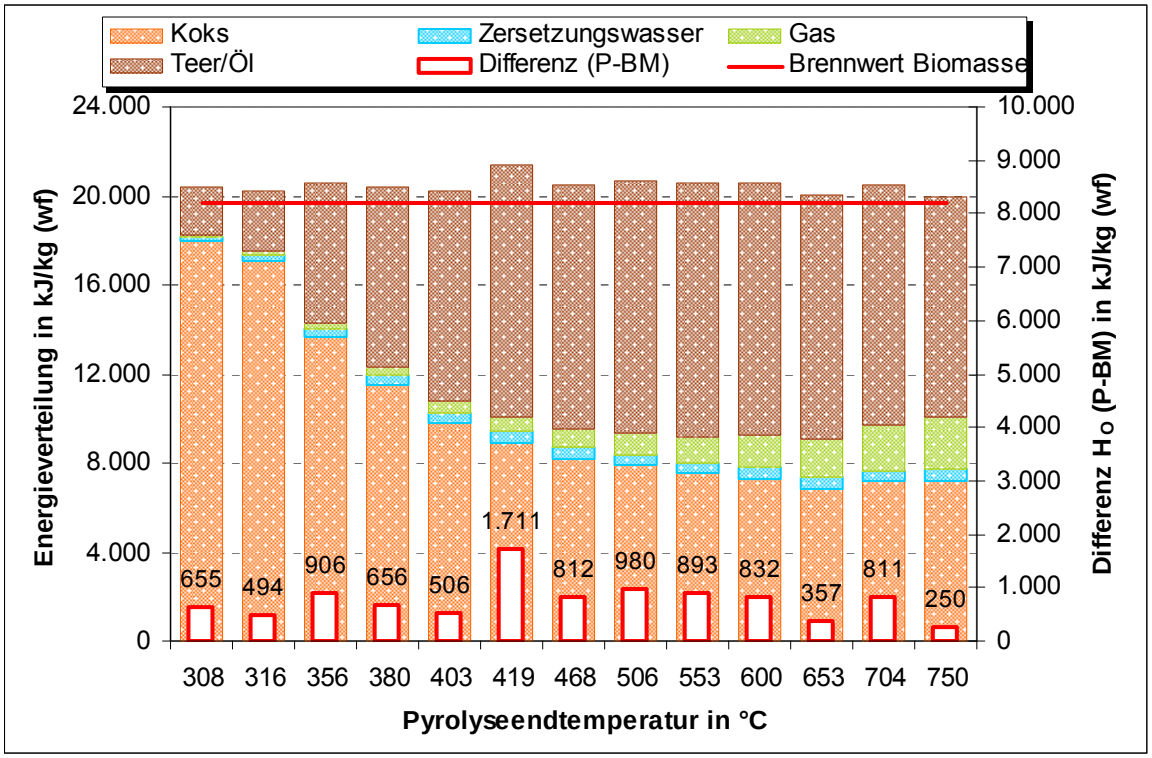


Abbildung 4-9: **Verteilung der chemisch gebundenen Energie auf die Pyrolyseprodukte in Abhängigkeit von der Temperatur bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte, rindenfrei) mit Schnellaufheizung**

Die Reaktionsenthalpie der Pyrolyse ist die Summe der Reaktionsenthalpien aller ablaufenden Einzelreaktionen. Verschiedene Studien zeigen, dass die Exothermie bei der Pyrolyse auf primäre Koksbildungsreaktionen infolge von Kondensationsreaktionen aromatischer Radikale unter Wasserstoffabspaltung (Dehydrierung) zurückzuführen ist, wobei die Endothermie mit der Bildung von primären flüchtigen Produkten in Verbindung gebracht wird /Mok1983/, /Rath2003/, /Milosavljevic1996/. Bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte, rindenfrei) wird über den gesamten untersuchten Temperaturbereich eine größere Energiemenge in den Produkten gebunden als ursprünglich im Ausgangsmaterial vorhanden war (s. Abbildung 4-9). Das Einsatzmaterial entbindet einen hohen Anteil an Flüchtigen, insbesondere in kondensierbarer Form, was auf den hohen Celluloseanteil (≈43 Ma.-% waf) zurückzuführen ist, daher überwiegen die endothermen Reaktionen. Für die Cellulosepyrolyse konnte auch in den DSC-Messungen eine stark endotherme Wärmetönung festgestellt werden (s. Kapitel 4.3.2, S. 126).

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass eine Erhöhung der Temperatur bei der Pyrolyse von Biomassen folgende Auswirkungen auf das Zersetzungsverhalten besitzt:

- Produktverteilung:
  - Abnahme der Koksausbeute durch fortschreitenden pyrolytischen Abbau der organischen Matrix bzw. Entbindung der flüchtigen Bestandteile;
  - Anstieg der Kondensatausbeute bis ca. 500 °C, dann stationärer Verlauf oder leichter Rückgang infolge sekundärer Spaltreaktionen (thermische Instabilität der Kohlenwasserstoffe → gilt ebenfalls für Teer/Öl;
  - Zunahme der Zersetzungswasserausbeute insbesondere bis 500 °C durch Abspaltung von OH-Gruppen, im weiteren Verlauf gleichbleibend;

- Zunahme der Gasausbeute durch Freisetzung von CO und CO_2 sowie ab 400 °C CH_4, H_2;

- Produktzusammensetzung:

  Koks

  - Anstieg des Aschegehaltes infolge Anreicherung im Feststoff durch zunehmenden Abbau der organischen Matrix;
  - Anstieg des Anteils an fixem Kohlenstoff und Kohlenstoff aus der Elementaranalyse in 2 Phasen zuungunsten des Flüchtigengehaltes;
  - Abnahme des Sauerstoffgehaltes insbesondere in der Hauptzersetzungsphase und kontinuierliche Abnahme des Wasserstoffgehaltes, da zunehmende Entbindung sauerstoff- und wasserstoffhaltiger Fragmente;
  - Anreicherung von Stickstoff im Feststoff, da die Spaltung von C-N-Bindungen insbesondere bei Beteiligung von aromatischen Kohlenstoffatomen hohe Bindungsenergien aufweist;

  Teer/Öl

  - leichte Zunahme des Kohlenstoffgehaltes bzw. Verlauf mit Maximum bei gleichzeitiger Abnahme an Sauerstoff (oder Ausbildung eines Minimums);
  - Wasserstoff bleibt zumeist unbeeinflusst oder steigt geringfügig an;
  - beim Stickstoffgehalt ergab sich kein eindeutiger Trend: holzartige Biomassen zeigten in der Hauptzersetzungsphase eine Abnahme und anschließend konstante Werte, bei den Strohsorten ergab sich ein Verlauf mit Minimum und bei den restlichen Halmgütern und den Silagen wurde Stickstoff im Teer/Öl angereichert → Ursache: unterschiedliche Einbindungsformen des Stickstoffs in der organischen Matrix;

  Gas

  - exponentieller Anstieg der Wasserstoffausbeute ab 500 °C durch Polykondensations-/Dehydrierungsreaktionen u. U. auch durch die thermischen Zersetzung von Kohlenwasserstoffen
  - Erhöhung der Methanfreisetzung ab 400 °C infolge Methylgruppenabspaltung, wobei bei höheren Temperaturen ein Grenzwert angestrebt wird
  - Kohlenmonoxid und Kohlendioxid als Primärprodukte der Pyrolyse sind die dominierenden Gasbestandteile → Bildung erfolgt bei Decarboxylierungs-/Decarbonylierungsreaktionen der organischen Matrix → zunehmende Ausbeute mit steigender Temperatur, wobei sich ab 600 °C eine Plateauphase einstellt
  - Erhöhung der Entbindung an gesättigten und ungesättigten C2- und C3-Kohlenwasserstoffen ab 400 °C durch Abspaltung aus der organischen Matrix bzw. der Zersetzung höherer Kohlenwasserstoffe, im Bereich zwischen 600 und 700 °C bei den meisten Biomassen keine bzw. geringfügige Ausbeutesteigerung

- Energieinhalt:
  - Erhöhung des Koksbrennwertes infolge der Kohlenstoffanreicherung und Sauerstoffverarmung, bei höheren Temperaturen Kompensation dieses Effektes durch die Anreicherung von mineralischen Komponenten insbesondere bei den aschereichen landwirtschaftlichen Biomassen → Brennwert bleibt konstant;
  - Teer/Öl-Brennwert nimmt bei den meisten der untersuchten Biomassen leicht zu und bleibt bei höheren Temperaturen konstant bzw. fällt leicht ab;
  - Zunahme des Gasbrennwertes infolge der erhöhten Freisetzung heizwertreicher Verbindungen wie H_2, CH_4, C_2- und C_3-Kohlenwasserstoffe.

Generell ist festzustellen, dass der Einfluss der Temperatur auf die ablaufenden Mechanismen bei der Pyrolyse von Biomasse gegenüber den rohstofflichen Einflussfaktoren überwiegt. Es ergeben sich also größtenteils die gleichen Trends für die Ausbeuten und Zusammensetzungen der Produkte in Abhängigkeit von der Temperatur. Allerdings verschieben sich in Abhängigkeit vom Rohstoff die Hauptzersetzungsbereiche und die Höhe der Werte für die genannten Größen.

4.1.3 Einfluss des Systemdrucks

Als weiterer Prozessparameter besitzt auch der Druck im System einen Einfluss auf die Pyrolysevorgänge der Biomasse. Dabei spielt bei der technischen Anwendung der Pyrolyse zur Koks- oder Teer/Öl-Erzeugung der Druck keine Rolle, da die Prozesse alle unter atmosphärischen Bedingungen ablaufen. Eine Druckerhöhung wäre infolge der Begünstigung verschiedener Mechanismen z. B. bezüglich der Teer/Öl-Ausbeute kontraproduktiv. Relevant sind erhöhte Drücke jedoch für Vergasungsverfahren, als deren Teilschritt auch die Pyrolyse abläuft. Mittels Drucksteigerung ergeben sich dort die Vorteile einer Durchsatzerhöhung, der Verringerung des Verdichtungsaufwandes (Elektroenergieverbrauch) sowie der Beeinflussung von Gleichgewichten der ablaufenden Vergasungsreaktionen. Die vorhandene Datenlage zum Einfluss des Drucks bei der Biomassepyrolyse ist jedoch sehr gering.

Die Untersuchungen zum Einfluss des Systemdrucks auf die Pyrolyse von Biomasse wurden in der eigens dafür konzipierten Druckpyrolyseanlage (DPA) durchgeführt. Die erzielten Ergebnisse werden nachfolgend dargestellt.

Die Veränderung der Morphologie des entstehenden Kokses in Abhängigkeit vom Druck bei der Weizenstrohpyrolyse zeigt Abbildung 4-10. Die Aufnahmen erfolgten mit einem Stereomikroskop, welches mit einer Kamera ausgestattet ist, unter 16facher Vergrößerung. Bei atmosphärischem Druck bleibt die Struktur des Ausgangsstoffes im Koks im Wesentlichen erhalten. Mit steigendem Druck bilden die Kokspartikel, insbesondere die, welche aus dem Koksauffangbehälter gewonnen werden konnten, zunehmend Kugelformen aus. Weiterhin nimmt auch der Oberflächenglanz mit der Druckerhöhung zu. Die im Reaktionsrohr zurückbleibenden Kokspartikel sind nicht vollständig umgesetzt und behalten auch bei höherem Druck weitestgehend die Struktur der Ausgangsbiomasse.

Die Ursache der Formänderung ist vermutlich darin zu suchen, dass durch die entgegengesetzt wirkenden Drücke (Gasdruck durch Entbindung der Flüchtigen aus dem

Partikelinneren und äußere Einwirkung des Gasdrucks auf das Partikel) und der gleichzeitigen Ausbildung eines plastischen Zustandes das Partikel die Form anstrebt, welche dem äußeren Zwang den geringsten Widerstand bietet (geringstes Oberfläche/Volumen-Verhältnis bei Kugel). Der zunehmende Glanz der Partikeloberfläche ist vermutlich auf gecrackte Kohlenwasserstoffverbindungen (sekundäre Pyrolysereaktionen) zurückzuführen, die sich an der Koksoberfläche anlagern.

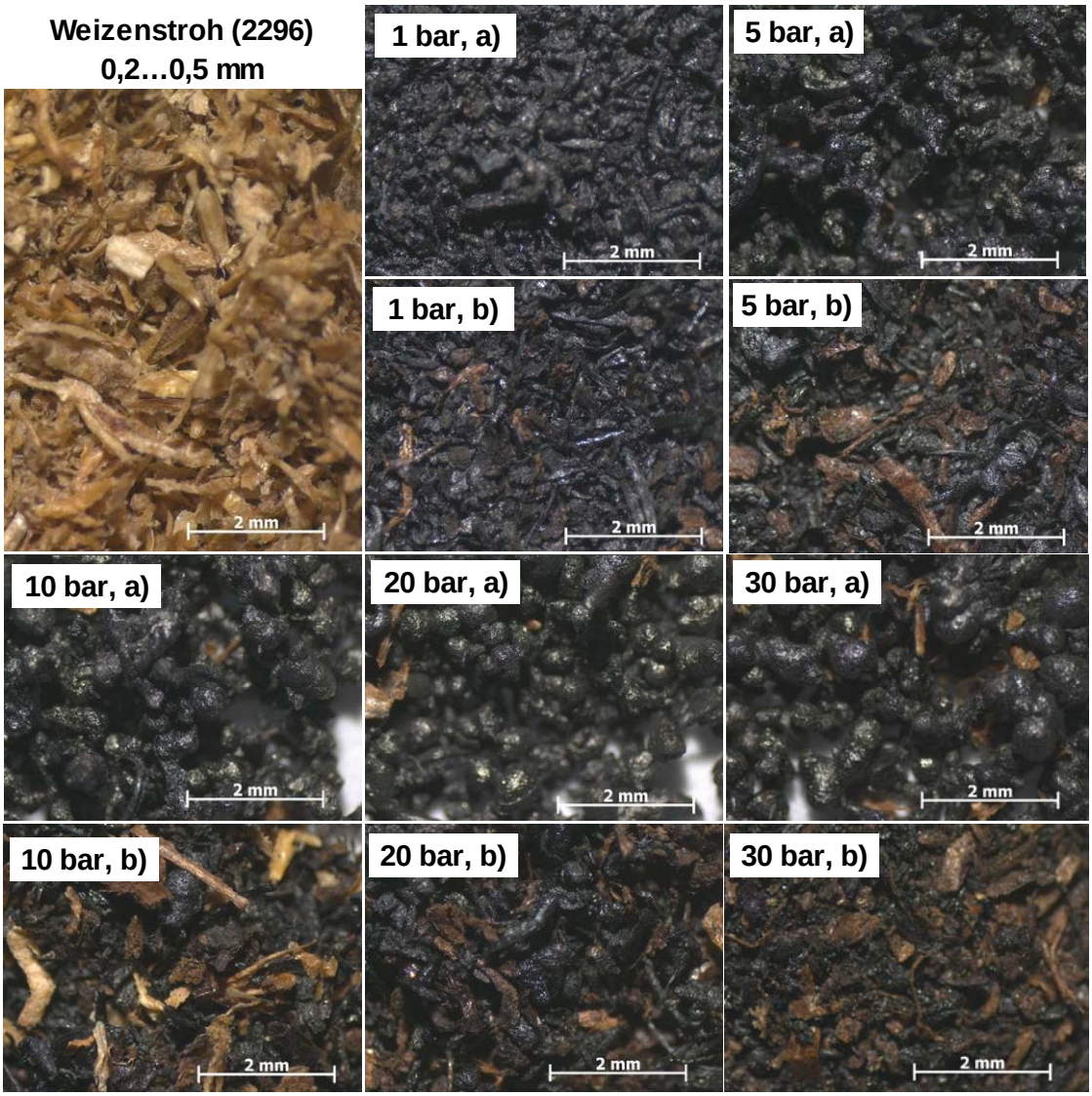


Abbildung 4-10: Einfluss des Systemdrucks auf die Morphologie des Kokses bei der Pyrolyse von Weizenstroh (2296) bei 800 °C im Fallrohrreaktor *(Legende: a) Koks aus dem Koksauffangbehälter; b) Koks aus dem Reaktionsrohr)*

Der Betrieb der Druckpyrolyseanlage brachte einige anlagenspezifische Probleme mit sich. Zum einen musste die Partikelgröße auf ein enges Körnungsband zwischen 0,2 und 0,5 mm aufbereitet werden. Der Feingutanteil führte immer wieder zu Problemen mit Brückenbildung in der Zuführung zwischen Vorratsbehälter und Schnecke sowie zum Festfahren der Förderschnecke. Das gröbere Aufgabegut konnte infolge der zu kurzen Verweilzeit in der heißen Zone (1.200 mm) nicht genügend umgesetzt werden. Im Weiteren war ein zufriedenstellender Betrieb des Fallrohres bei Druckfahrweise nicht möglich, da sich in Abhängigkeit von der eingestellten Temperatur auf unterschiedlichen Höhen im Reaktor Anbackungen des Feststoffes an der Reaktorwand bil-

deten, welche zum Aufbau einer Materialschüttung führten. Somit werden zwar die gewünschten schnellen Aufheizraten erreicht, allerdings verlängert sich die Feststoffverweilzeit bei der jeweiligen Pyrolysetemperatur erheblich.

Daher konnten für die meisten Versuche zwei Feststoffproben aus der Anlage entnommen werden – eine aus dem Reaktionsrohr (RR) und eine aus dem Koksauffangbehälter (KAB). Eine Analyse der Zusammensetzung war jedoch in den meisten Fällen aufgrund der anfallenden Mengen nur für eine der beiden Proben möglich. Die unterschiedliche Beschaffenheit der Kokse zeigt jedoch bereits Abbildung 4-10. Um die Problematik der Verstopfung des Reaktionsrohres zu beheben, wurden verschiedene Maßnahmen (z. B. Anbringen von Begleitheizungen oberhalb der Heizelemente, Erhöhung des Spülgasstromes, Mischung der Biomasse mit einem Inertmaterial) getestet, die jedoch nicht zum Erfolg führten. Testversuche mit einer deutschen Braunkohle unter erhöhtem Druck ergaben einen zufriedenstellenden Betrieb des Fallrohres ohne Verstopfungen. Die Ursache der Anbackungen im Reaktionsrohr beim Betrieb mit Biomasse konnten nicht abschließend aufgeklärt werden. Es liegt jedoch nahe, dass die faserige Struktur der Biomasse einen Beitrag zum Aufbau der Materialschüttung leistet.

Von den bei den Pyrolyseversuchen zurückgewinnbaren Flüssigprodukten konnten nur wenige hinsichtlich ihrer Zusammensetzung charakterisiert werden. Ursache dafür war, dass infolge des hohen Wassergehaltes bei vielen Kondensaten eine Trennung von organischer und wässriger Phase auftrat. Nach Separation der beiden Phasen über einen Scheidetrichter war in den meisten Fällen nur noch eine ungenügende Menge für die Analyse verfügbar.

Auf eine vollständige Bilanzierung der Pyrolyseversuche wurde aus den oben genannten Gründen verzichtet und im Folgenden nur der Einfluss des Drucks auf die Produktverteilung sowie die Zusammensetzung des Pyrolysegases gezeigt.

Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2478)

Abbildung 4-11 zeigt die ermittelte Produktverteilung für die Pyrolyse des Sägerestholzes in Abhängigkeit vom eingestellten Druck. Zusätzlich ist die Temperatur dargestellt, bei welcher sich die erste Materialablagerung bildete. Bis zu einem Druck von 10 bar entspricht diese Temperatur mit Werten zwischen 750 und 800 °C annähernd der eingestellten Reaktortemperatur von 800 °C. Für die Druckstufen 20 und 30 bar ergeben sich dann lediglich noch Temperaturen im Bereiche zwischen 600 und 700 °C. Die Untersuchungen zum Einfluss der Temperatur bis 750 °C an der Laborpyrolyseanlage haben jedoch gezeigt, dass bei Temperaturen über 600 °C kaum mehr ein Einfluss auf die Koksausbeute festzustellen ist und sich ab 700 °C lediglich die Ausbeuten an Gas und Flüssigprodukt verschieben. Somit ist davon auszugehen, dass die Auswirkungen der unterschiedlichen Temperaturen den Einfluss des Druckes nicht überwiegen.

Im Druckbereich bis 10 bar zeigt sich eine deutliche Abnahme der Gasausbeute (-26,4 Ma.-% wf) bei gleichzeitiger Erhöhung von Koks- und Flüssigproduktausbeute (+20,3 bzw. 6,1 Ma.-% wf). Eine weitere Erhöhung des Drucks bis auf 20 bar hat kaum Auswirkungen auf die Produktverteilung. Bei 30 bar hingegen kommt es zu einer deutlich erhöhten Koksbildung (+18,6 Ma.-% wf) bei verringerter Gasproduktion (-16,8 Ma.-% wf). Auch die Flüssigproduktausbeute nimmt leicht ab.

Neben der Gesamtkoksausbeute sind auch die an den verschiedenen Stellen (Reaktionsrohr, Koksauffangbehälter) entnommenen Koksmengen dargestellt. Hier zeigt sich, dass im Druckbereich zwischen 5 und 20 bar nur ein sehr geringer Anteil Koks durch das Reaktionsrohr gefallen ist, da es zu Anbackungen und schließlich zur Verstopfung des Rohres kam. Warum bei 30 bar wiederum knapp ein Viertel bis in den Auffangbehälter gelangte, konnte im Rahmen der Versuche nicht geklärt werden.

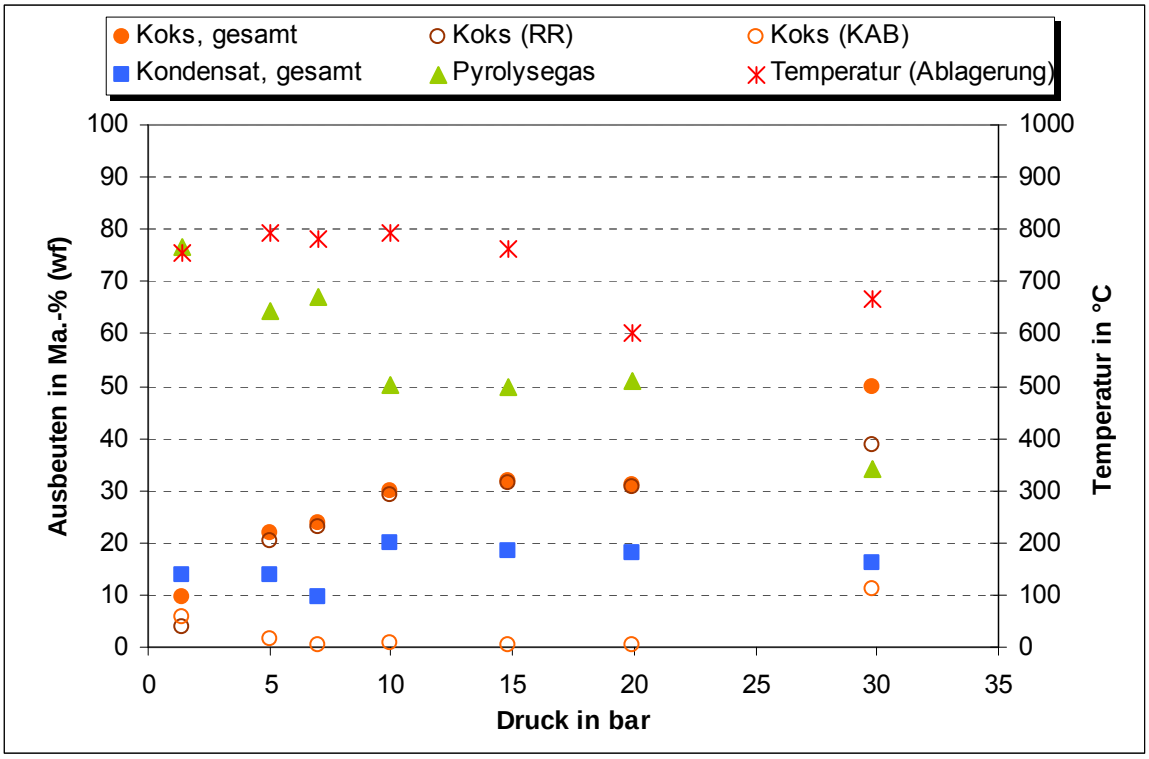


Abbildung 4-11: **Einfluss des Systemdrucks auf die Produktverteilung bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2478) in der Druckpyrolyseanlage (Fallrohrbetrieb) bei 800 °C (Körnung: 0,2…0,5 mm)**

Die Gasausbeute bei der Pyrolyse von Sägerestholz (s. Abbildung 4-12) sinkt zunächst bis zu einem Druck von 10 bar (-277,1 l i.N./kg BM), bleibt anschließend bis 20 bar auf einem Plateau und sinkt dann bis 30 bar nochmals deutlich ab (-138,1 l i.N./kg BM). Der Abfall wird dabei wesentlich durch den Rückgang der Kohlenmonoxidfreisetzung (bis 10 bar: -201,6 l i.N./kg BM) verursacht. Bei weiterer Druckerhöhung nimmt die Freisetzung von Kohlenmonoxid nochmals um 91,2 l(i.N.)/kg BM ab. Als Ursache ist zu vermuten, dass die Reaktionen, welche zur Entbindung von CO führen, bei einer Druckerhöhung gehemmt ablaufen. Weiterhin könnten auch Vergasungsreaktionen (z. B. Boudouard-Reaktion, $C + CO_2 \leftrightarrow 2\,CO$) eine Rolle spielen. Durch eine Druckerhöhung kommt es bei der Boudouard-Reaktion zur Verschiebung der Gleichgewichtslage. Die Bildung von Kohlenmonoxid wird infolge der Volumenzunahme gehemmt und die Rückreaktion zu Kohlenstoff und Kohlendioxid begünstigt (Prinzip von Le Chatelier). Infolge der bei 800 °C noch geringen Reaktionsgeschwindigkeit wird dieser Effekt jedoch als weniger bedeutend eingestuft. Bei der Ausbeute an CO_2 deutet der Verlauf auf zwei unterschiedliche Entbindungsmechanismen mit einem Maximum zwischen 5 und 7 bar bzw. zwischen 20 und 25 bar hin. Generell wird im Druckbereich bis 10 bar deutlich weniger CO_2 verglichen mit CO entbunden. Bei den Untersuchungen im Festbettreaktor wurde bei 750 °C nur eine geringfügig höhere Ausbeute an Kohlenmonoxid gegenüber Kohlendioxid festgestellt.

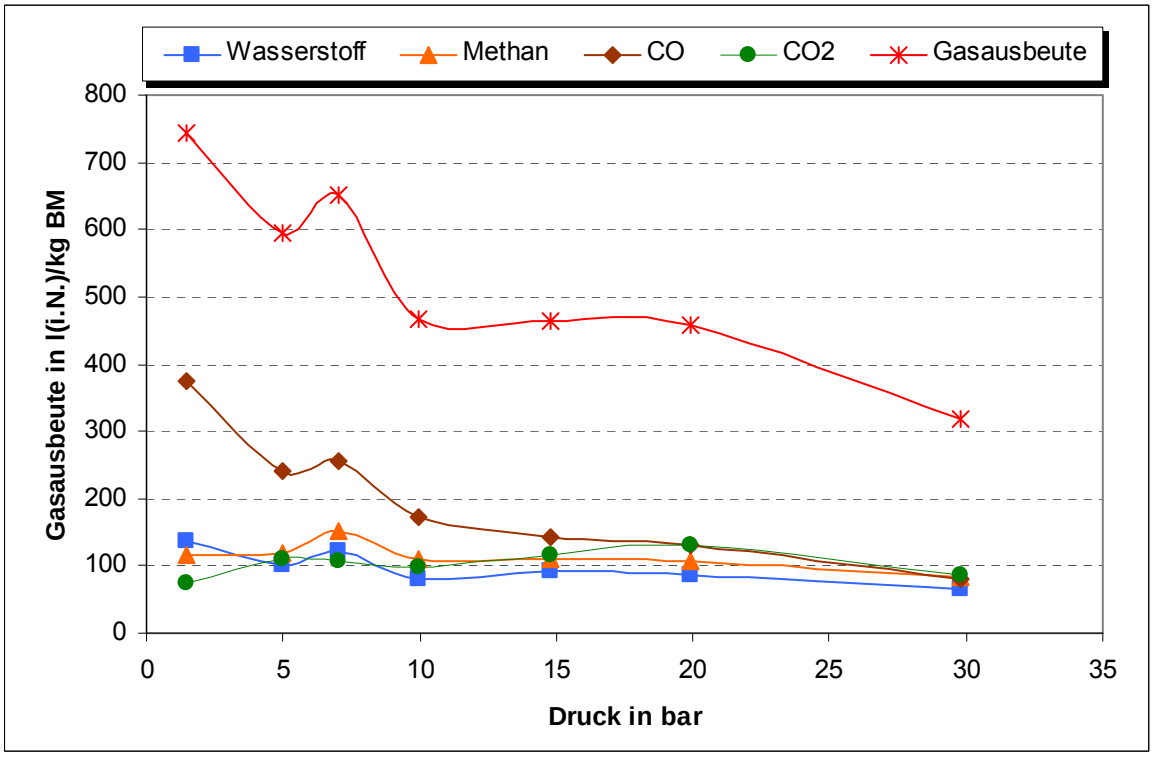


Abbildung 4-12: **Einfluss des Systemdrucks auf die Ausbeute der Hauptgaskomponenten bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2478) in der Druckpyrolyseanlage (Fallrohrbetrieb) bei 800 °C (Körnung: 0,2…0,5 mm)**

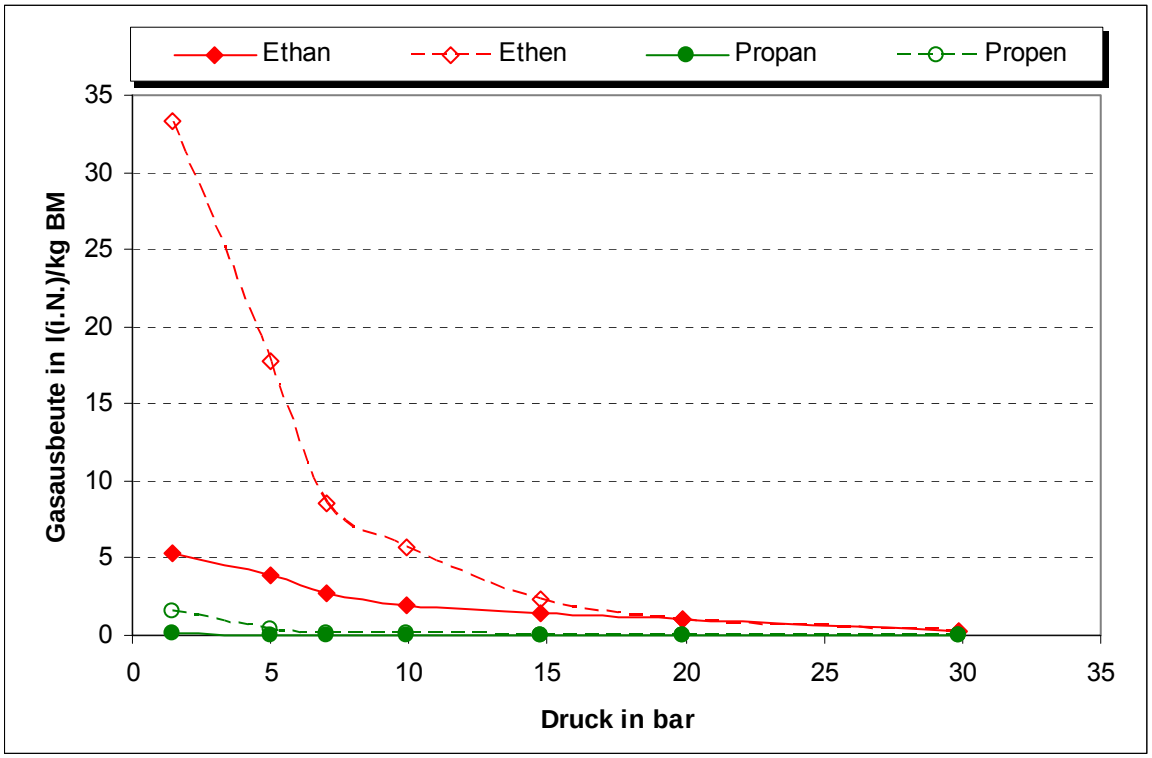


Abbildung 4-13: **Einfluss des Systemdrucks auf die Ausbeute der C2- und C3-Kohlenwasserstoffe bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2478) in der Druckpyrolyseanlage (Fallrohrbetrieb) bei 800 °C (Körnung: 0,2…0,5 mm)**

Die Ausbeute an Wasserstoff verhält sich analog zur Gesamtgasausbeute: bis 10 bar ergibt sich eine Abnahme gefolgt von einer Plateauphase bis 20 bar und einem weiteren Absinken bis 30 bar. Methan wird bis 20 bar kaum beeinflusst (110…120 l i.N./kg BM), bei weiterer Druckerhöhung nimmt die Ausbeute leicht ab (84 l i.N./kg BM). Eine Ausnahme bildet der Versuch bei 7 bar, der bei allen Hauptgaskomponenten außerhalb des allgemeinen Trends liegt. Ob dieses Verhalten einen signifikanten Effekt darstellt, muss noch überprüft werden, da dieser Versuch als einziger nicht wiederholt wurde.

Als weitere Komponenten des Pyrolysegases konnten Ethen, Ethan und Propen in signifikanten Mengen festgestellt werden (s. Abbildung 4-13). Mit steigendem Druck ergibt sich dabei insbesondere bis 10 bar ein deutlicher Abfall dieser Verbindungen (Ethen: -27,6; Ethan: -3,3; Propen: -1,51 l(i.N.)/kg BM). Bei 30 bar verschwinden diese Kohlenwasserstoffe aus dem Pyrolysegas. Verglichen mit den Ergebnissen aus der Festbettapparatur ergeben sich hier größere Mengen an einfach ungesättigten gegenüber gesättigten Kohlenwasserstoffen.

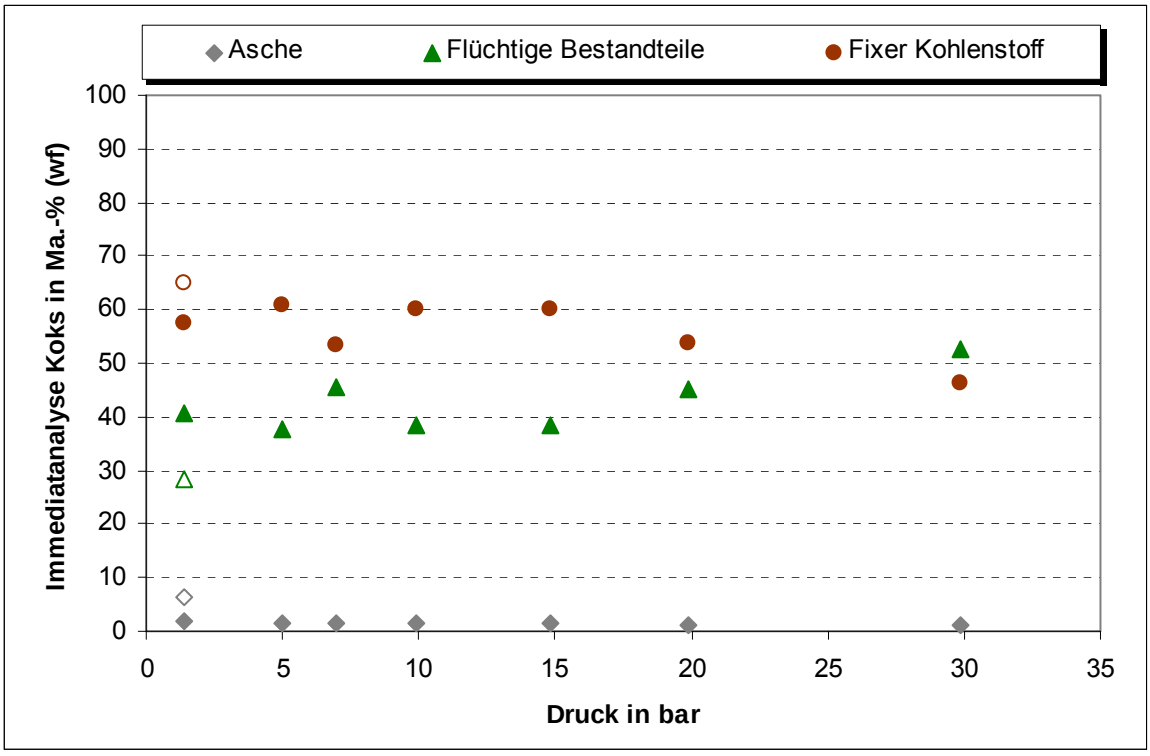


Abbildung 4-14: **Einfluss des Systemdrucks auf die Zusammensetzung des Kokses (Immediatanalyse) bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2478) in der Druckpyrolyseanlage (Fallrohrbetrieb) bei 800 °C (Körnung: 0,2…0,5 mm)** *(Legende: ausgefüllte Symbole: Koks aus Reaktionsrohr, umrandete Symbole: Koks aus Koksauffangbehälter)*

Die Zusammensetzung des Kokses wird bei Drücken bis 15 bar kaum beeinflusst (s. Abbildung 4-14). Der Koks weist Flüchtigengehalte um 40 Ma.-% (wf). Vergleicht man diese Werte mit den Ergebnissen der Festbettapparatur sowie den thermogravimetrischen Untersuchungen so würde dies nur einer Pyrolysetemperatur von 400 °C entsprechen. Eine weitere Druckerhöhung bewirkt eine Abnahme des Gehalts an Fixem Kohlenstoff (-13,6 Ma.-% wf) zugunsten der flüchtigen Bestandteile. Folglich steigt

auch die im Koks enthaltenen Sauerstoffmenge (+5,9 Ma.-% wf) (s. Anhang Abb Anhang E-1).

Ein Vergleich der Zusammensetzung der Kokse unter atmosphärischen Druckbedingungen, welche aus unterschiedlichen Orten des Reaktors entnommen wurden (s. Abbildung 4-14), zeigt, dass das Material aus dem Koksauffangbehälter einen höheren Grad der pyrolytischen Zersetzung (höherer Gehalt an fixem Kohlenstoff, höherer Aschegehalt) erreicht hat, obwohl dessen Verweilzeit in der heißen Zone wesentlich kürzer war. Für die weiteren Versuchspunkte erfolgte aufgrund der geringen anfallenden Koksmengen im Auffangbehälter keine Analyse.

Folgende Ursachen lassen sich für die aufgetretenen Effekte in Abhängigkeit des Systemdrucks bei der Pyrolyse von Sägerestholz finden: Die deutliche Abnahme der Gasausbeute zwischen 1 und 10 bar sowie der Anstieg der Koks und Flüssigproduktausbeute verbunden mit der deutlichen Reduzierung der Menge an C2- und C3-Kohlenwasserstoffen sowie des Wasserstoffs im Gas deuten auf sekundäre Pyrolysereaktionen in Form von Anlagerungsreaktionen gasförmiger Radikale am Koks bzw. Rekombinationsreaktionen in der Gasphase (Erhöhung Flüssigproduktausbeute) hin. Bei sehr hohen Drücken (≥ 20 bar) ist es wahrscheinlich, dass Decarboxylierungs-/Decarbonylierungsreaktionen der Feststoffmatrix gehemmt werden, da die Ausbeuten an CO und CO_2 im Gas abnehmen und der Koks einen geringeren Umsatzgrad (Flüchtige ↑, Fixer Kohlenstoff ↓, Sauerstoff ↑) aufweist. Zudem steigt die Koksausbeute zwischen 20 und 30 bar zuungunsten der Gasausbeute.

Pyrolyse von Weizenstroh (2296)

Die Produktverteilung in Abhängigkeit des Systemdrucks bei der Pyrolyse von Weizenstroh im Fallrohr ist Abbildung 4-15 zu entnehmen. Die Temperaturen bei denen sich Ablagerungen im Reaktionsrohr bildeten liegen gegenüber dem Sägerestholz niedriger (Minimum: 450 °C bei 7 bar). Verglichen mit den Untersuchungen zur Pyrolyse des Weizenstrohs im Festbettreaktor ist über 450 °C vermutlich kein wesentlicher Einfluss der Temperatur auf die Koksausbeute zu erwarten. Bei der Freisetzung der flüchtigen Bestandteile werden jedoch Auswirkungen auftreten.

Die Koksausbeute steigt bis zu einem Druck von 15 bar an und erreicht dort einen Wert von 50,3 Ma.-% (wf). Mit Ausnahme der Versuche bei 1 und 5 bar konnten keine signifikanten Mengen an Koks im Auffangbehälter festgestellt werden. Die Ausbeute an Flüssigprodukt nimmt bis 10 bar ab (Ausnahme: 5 bar), bleibt bei einer weiteren Drucksteigerung zunächst auf einem konstanten Wert um 10 Ma.-% (wf) und nimmt anschließend wieder leicht zu. Die Gasausbeute verringert sich bis 7 bar und steigt dann wieder leicht an. Die Werte liegen im gesamten untersuchten Druckbereich zwischen 40 und 50 Ma.-% (wf).

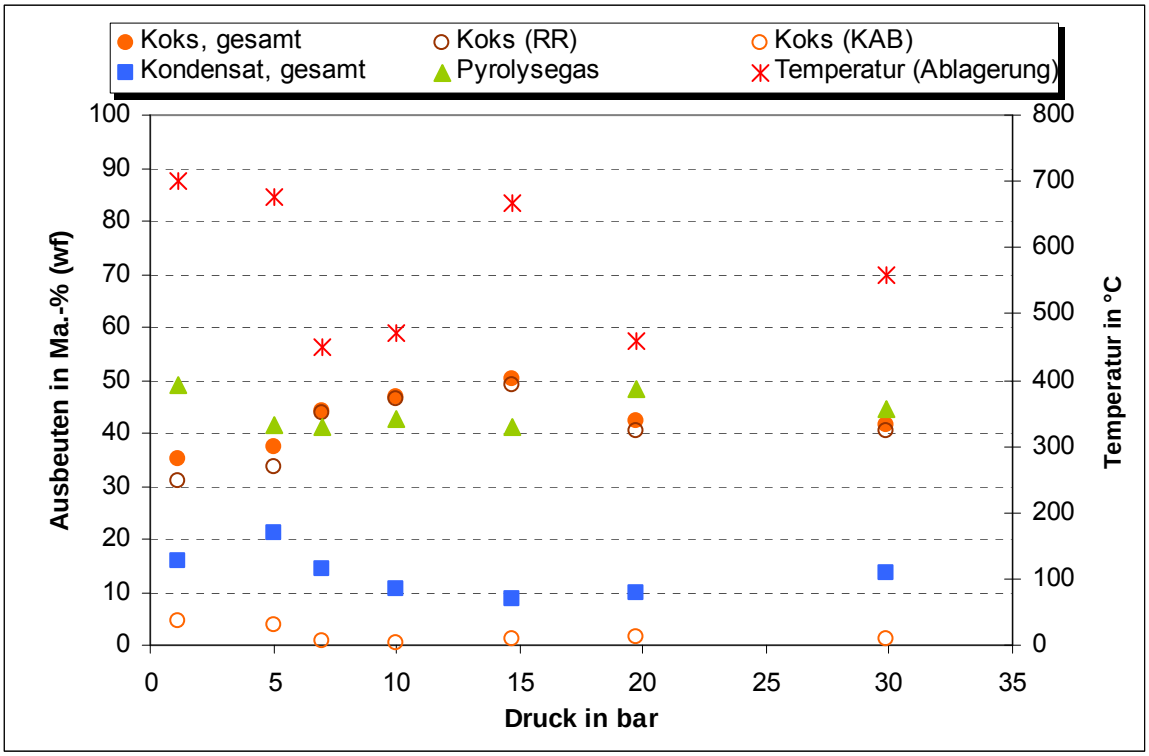


Abbildung 4-15: **Einfluss des Systemdrucks auf die Produktverteilung bei der Pyrolyse von Weizenstroh (2296) in der Druckpyrolyseanlage (Fallrohrbetrieb) bei 800 °C (Körnung: 0,2…0,5 mm)** *(Legende: ausgefüllte Symbole: Koks aus Reaktionsrohr, umrandete Symbole: Koks aus Koksauffangbehälter)*

Die Gasausbeute liegt bei der Pyrolyse von Weizenstroh mit Werten zwischen 338 und 426 l i.N./kg BM deutlich niedriger als beim Sägerestholz (s. Abbildung 4-16). Ein Grund dafür sind vermutlich die verringerten Pyrolysetemperaturen (450…700 °C). In Abhängigkeit vom Druck ist bis 20 bar ein leichter Anstieg der Gasausbeute zu erkennen (Ausnahme: 1 bar), danach scheint sich ein eher konstanter Werte (~400 l i.N./kg BM) einzustellen. Bei den Hauptgaskomponenten steigen die Ausbeuten von Methan, Wasserstoff und Kohlenmonoxid bis 20 bar an und laufen dann auf den erreichten Wert (~100 l i.N./kg BM) aus. Die Kohlenmonoxidausbeute hingegen nimmt bis 15 bar leicht ab, um bei einer weiteren Druckerhöhung wieder leicht anzusteigen. Bei der Pyrolyse von Weizenstroh im Fallrohr ergibt sich wie auch bei den Festbettversuchen eine höhere Ausbeute an Kohlenmonoxid verglichen mit Kohlendioxid.

Betrachtet man die Ausbeuten der C2- und C3-Kohlenwasserstoffe so lässt sich ein ähnliches Verhalten wie bei der Pyrolyse von Sägerestholz beobachten. Die Ausbeuten an Ethen, Ethin, Propen und Propin nehmen mit steigendem Druck exponentiell ab. Ethan zeigt sich hingegen kaum beeinflusst und sinkt erst zwischen 20 und 30 bar leicht. Propan konnte lediglich bei 1 bar in sehr geringen Mengen im Pyrolysegas detektiert werden.

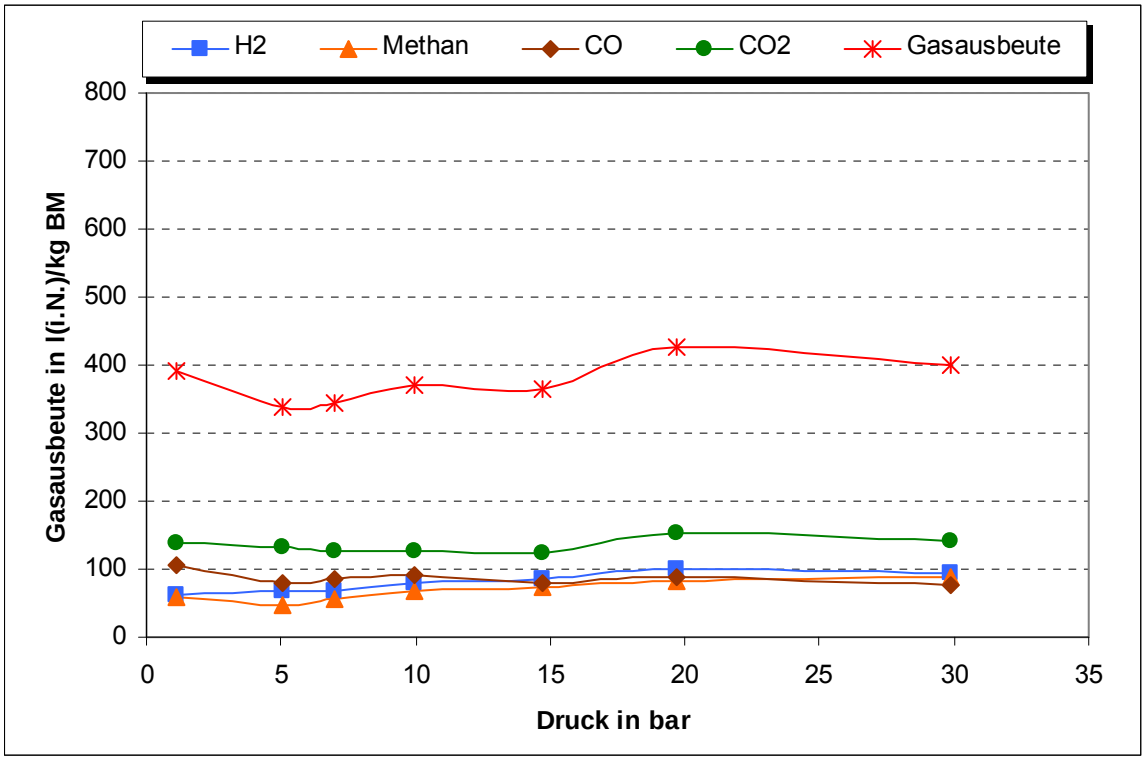


Abbildung 4-16: **Einfluss des Systemdrucks auf die Gasausbeute und die Ausbeute der Hauptgaskomponenten bei der Pyrolyse von Weizenstroh (2296) in der Druckpyrolyseanlage (Fallrohrbetrieb) bei 800 °C (Körnung: 0,2…0,5 mm)**

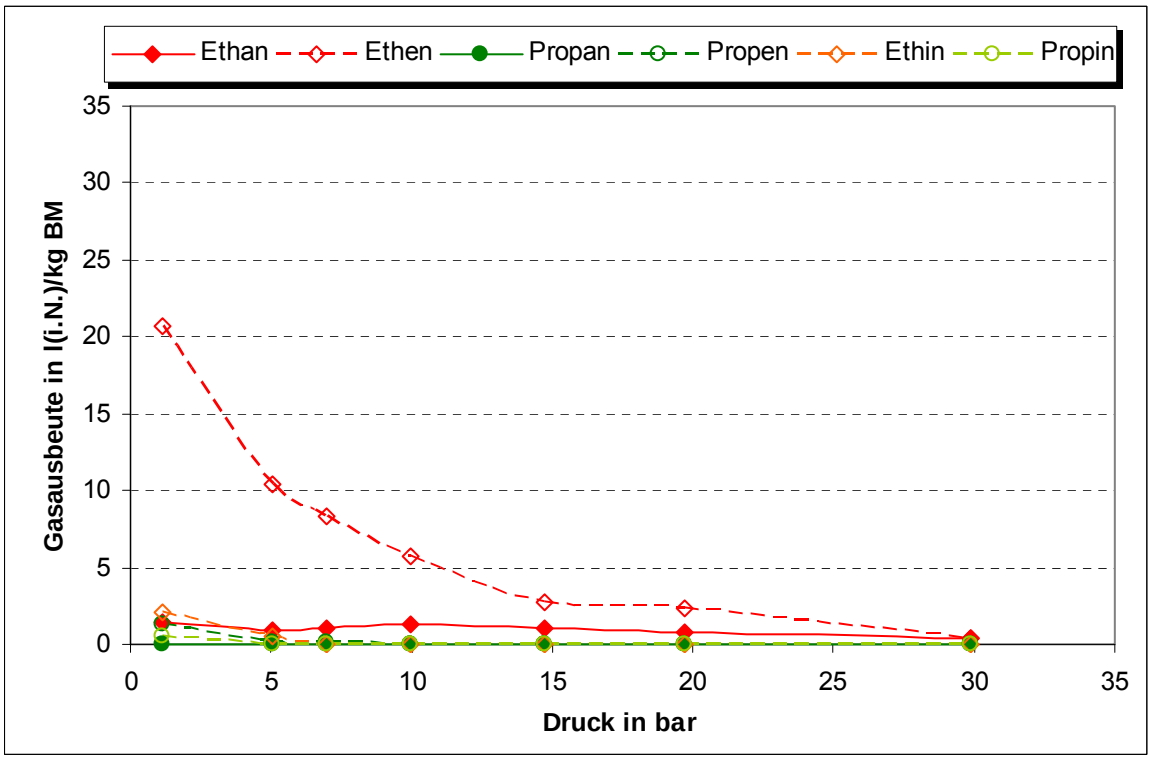


Abbildung 4-17: **Einfluss des Systemdrucks auf die Ausbeute der C2- und C3-Kohlenwasserstoffe bei der Pyrolyse von Weizenstroh (2296) in der Druckpyrolyseanlage (Fallrohrbetrieb) bei 800 °C (Körnung: 0,2…0,5 mm)**

Eine Veränderung der Kokszusammensetzung in Abhängigkeit vom Systemdruck konnte insbesondere bis 15 bar festgestellt werden (s. Abbildung 4-18). Hier steigt der Anteil flüchtiger Komponenten (+21,7 Ma.-% wf) bei gleichzeitiger Verringerung des Gehalts an fixem Kohlenstoff (-16,8 Ma.-% wf) und Asche (-4,9 Ma.-% wf). Eine weitere Erhöhung des Drucks kehrt diesen Effekt um, wenngleich weniger deutlich. Unter atmosphärischen Druckbedingungen besitzt der Koks 28,4 Ma.-% wf flüchtige Bestandteile. Dies entspricht bei den Festbettversuchen einer Temperatur von ca. 390 °C. Bei 15 bar erreicht der Koks 50,1 Ma.-% wf flüchtige Komponenten, was lediglich einer Temperatur von ca. 300 °C gleichkommt. Bis zu einem Druck von 15 bar steigen im Weiteren auch der Sauerstoff- sowie der Wasserstoffgehalt im Koks bei gleichzeitigem Absinken des Kohlenstoffanteils (s. Anhang E Abb Anhang E-2). Auch Stickstoff sinkt geringfügig.

Ähnlich wie beim Sägerestholz weist der Koks aus dem Auffangbehälter unterhalb des Reaktionsrohres auch bei der Weizenstrohpyrolyse einen höheren Grad der pyrolytischen Zersetzung auf (s. Abbildung 4-18). Dabei ist der Flüchtigengehalt gegenüber dem Koks aus dem Reaktionsrohr um 11,9 Ma.-% waf verringert und es ergibt sich eine deutliche Anreicherung von mineralischen Komponenten (+16,3 Ma.-% wf).

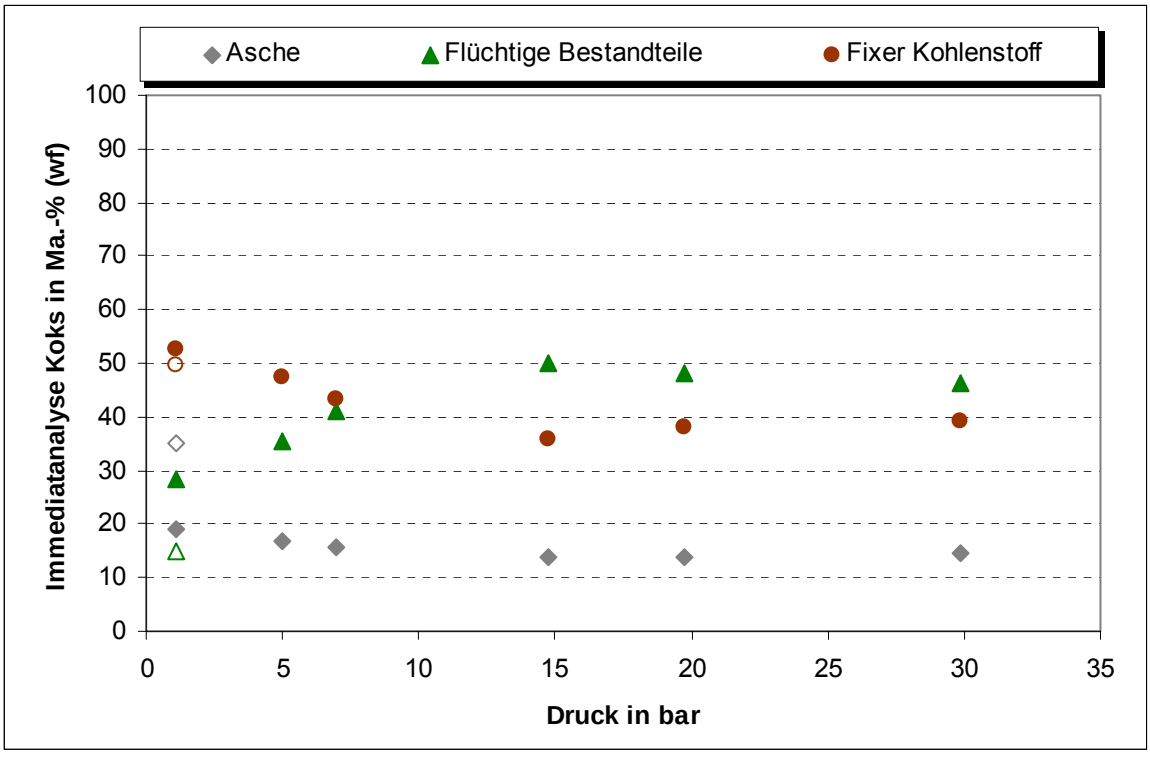


Abbildung 4-18: **Einfluss des Systemdrucks auf die Zusammensetzung des Kokses (Immediatanalyse) bei der Pyrolyse von Weizenstroh (2296) in der Druckpyrolyseanlage (Fallrohrbetrieb) bei 800 °C (Körnung: 0,2…0,5 mm)** *(Legende: ausgefüllte Symbole: Koks aus Reaktionsrohr, umrandete Symbole: Koks aus Koksauffangbehälter)*

Bei den Untersuchungen zur Pyrolyse des Weizenstrohs unter verschiedenen Drücken im Fallrohrreaktor ist die Deutung der auftretenden Effekte schwierig, da sich der Einfluss des Drucks und der Temperatur (aufgrund der Ablagerungen im Reaktionsrohr) überschneiden. Dennoch ist bei Drücken bis 15 bar das Auftreten von sekundären Reaktionen zu vermuten, wobei überwiegend Anlagerungsreaktionen am Feststoff ablau-

fen, da sowohl die Gas- als auch die Kondensatausbeuten abnehmen. Dies würde auch zum Anstieg des Flüchtigen-, Sauerstoff- und Wasserstoffgehaltes im Koks passen.

Die Untersuchungen des Druckeinflusses auf die Pyrolyse von Biomasse sowie die Erzielung vergleichbarer Ergebnisse gestalteten sich aufgrund der anlagenspezifischen Probleme schwierig. Generell ist jedoch festzustellen, dass der Druck einen erheblichen Einfluss auf die Biomassepyrolyse besitzt. Die genauen Effekte sowie der Einfluss der Temperatur bei unterschiedlichem Druck sind in weiteren Untersuchungen aufzuklären.

Beim Vergleich der Ergebnisse, welche mit den beiden unterschiedlichen Reaktorprinzipien erzielt wurden, fällt auf, dass im Fallrohrbetrieb wesentlich größere Gasmengen und stark verminderte Kondensatmengen anfallen, was auf das Ablaufen sekundärer Zersetzungsreaktionen hindeutet. Zudem ergibt sich ein geringerer Grad der pyrolytischen Zersetzung.

4.1.4 Einfluss der Aufheizgeschwindigkeit

Die Aufheizgeschwindigkeit als weiterer technisch relevanter Prozessparameter beeinflusst die Produktausbeuten und -zusammensetzungen bei der Pyrolyse ebenfalls. Während in Fest- oder Wanderbettverfahren eher niedrige Aufheizgeschwindigkeiten (Bereich bis 50 K/min) erreicht werden, kommt es in Wirbelschicht und Flugstromreaktoren zu einer deutlich schnelleren Aufheizung, da sehr kleine Partikel in den heißen Reaktor gelangen (Wirbelschicht: bis 500 K/min; Flugstrom: ~1.000 K/s oder höher). Die prinzipiell ablaufenden Mechanismen zur Beeinflussung der Produktausbeuten stellen sich wie folgt dar: Steigende Aufheizgeschwindigkeiten führen zu einer Erhöhung der Flüssigproduktausbeute zuungunsten der Ausbeute an Koks und Pyrolysegas. Die Gründe sind in der Begünstigung bzw. Hemmung verschiedener Zersetzungsreaktionen zu suchen. Höhere Aufheizgeschwindigkeiten begünstigen die Depolymerisationsreaktionen der Cellulose sowie die Entbindung von flüchtigen Bestandteilen, während die Dehydratation zu Anhydrocellulose und die Koksbildungsreaktionen gehemmt ablaufen /Fengel2003/. Die Ursache liegt in der Unterdrückung von Sekundärreaktionen durch die kurzen Verweilzeiten der flüchtigen Produkte im Feststoff.

Nachfolgend wird der Einfluss der Aufheizgeschwindigkeit bei der Pyrolyse von Biomasse exemplarisch am Beispiel Weizenstroh (2275) erläutert. Die Ergebnisse zur Variation der Aufheizrate bei der Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde), Sägerestholz (Fichte, rindenfrei), Triticale-Ganzpflanze und Maissilage sind Anhang F zu entnehmen.

Betrachtet man zunächst die Morphologie der gebildeten Kokse, lässt sich erkennen, dass die Struktur des Ausgangsmaterials mit steigender Aufheizgeschwindigkeit zunehmend verloren geht (s. Abbildung 4-19), da durch die wesentlich schnellere Flüchtigenentbindung ein anderes Porensystem gebildet wird.

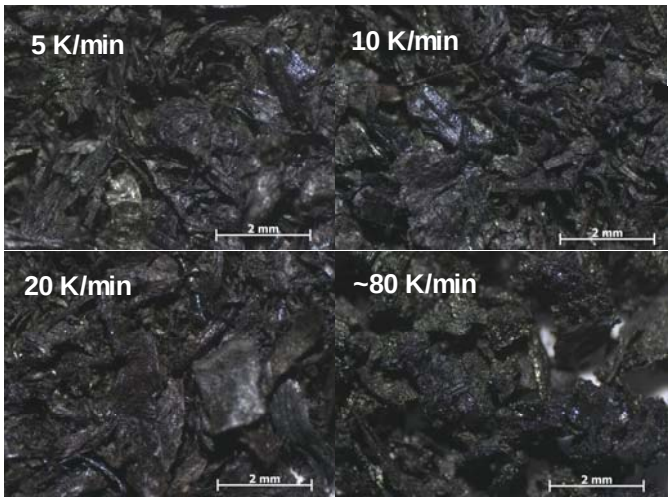


Abbildung 4-19: **Einfluss der Aufheizgeschwindigkeit auf die Morphologie des Kokses bei der Pyrolyse von Weizenstroh (2275) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm)**

Produktverteilung

Der Einfluss der Aufheizgeschwindigkeit im Bereich zwischen 5 und 85 K/min ist für die Pyrolyse von Weizenstroh bei 500 °C nur wenig ausgeprägt (s. Abbildung 4-20). Es ist lediglich ein leichter Anstieg beim Flüssigprodukt, wobei Teer/Öl steigt und Zersetzungswasser fällt, sowie ein geringer Abfall bei Gas und Koks feststellbar. Bei einer Pyrolysetemperatur von 400 °C treten die gleichen Effekte deutlicher auf (s. Abbildung 4-21).

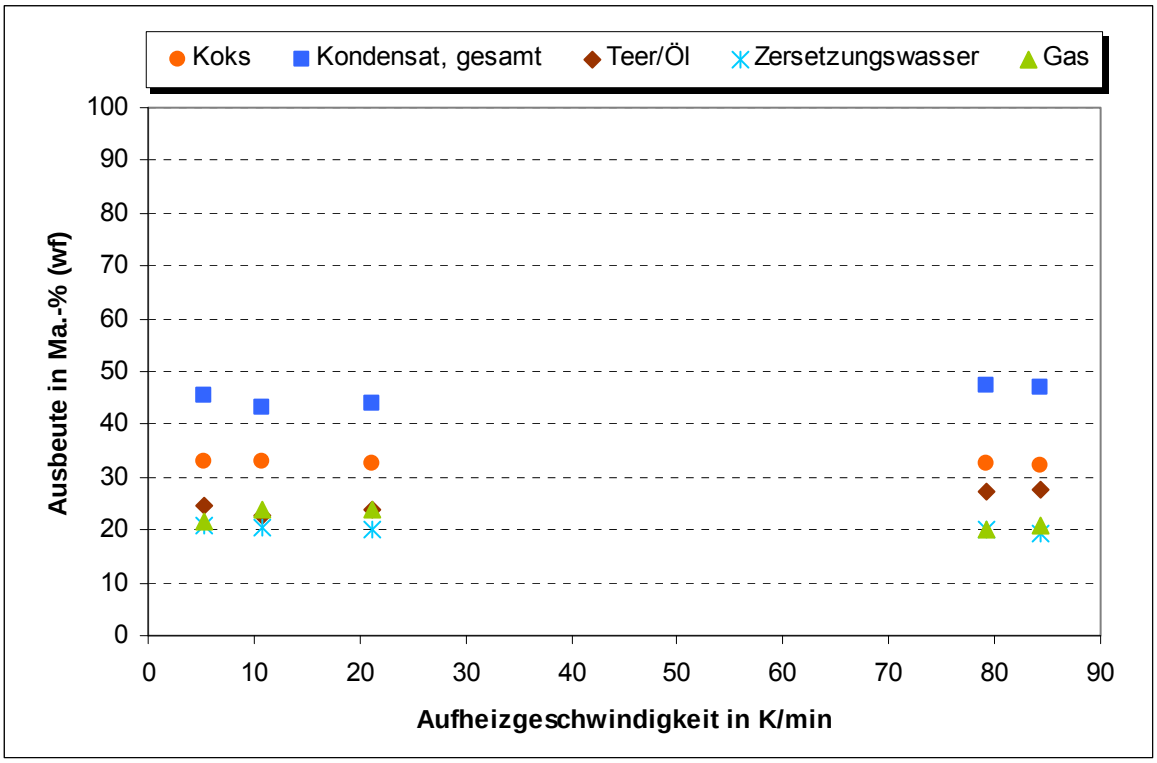


Abbildung 4-20: **Einfluss der Aufheizgeschwindigkeit auf die Produktausbeuten bei der Pyrolyse von Weizenstroh (2275) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm)**

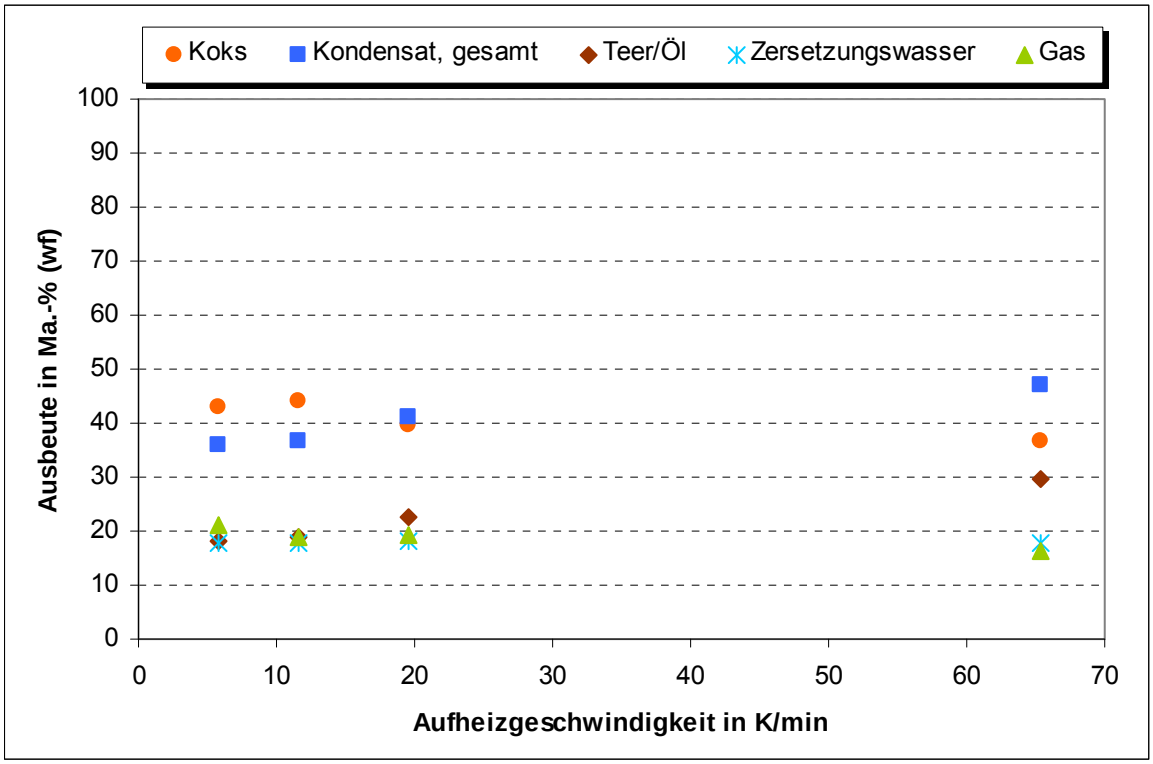


Abbildung 4-21: Einfluss der Aufheizgeschwindigkeit auf die Produktausbeuten bei der Pyrolyse von Weizenstroh (2275) bei 400 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm)

Für die Pyrolyse von Waldrestholz ergeben sich ähnliche Effekte (s. Anhang F Abb Anhang F-2). Bei 400 °C geht der Anstieg in der Kondensatausbeute bei der Waldrestholzpyrolyse mit einem Rückgang der entbundenen Gasmenge einher, während die Koksausbeute unverändert bleibt. Bei 500 °C hingegen steigt die Kondensatausbeute, was auf eine erhöhte Entbindung organischer Bruchstücke (Teer/Öl) zurückzuführen ist. Die Zersetzungswasserausbeute nimmt gleichzeitig leicht ab. Die Ausbeute an Koks fällt mit steigender Aufheizrate, während die freigesetzte Gasmenge unverändert bleibt. Ähnliche Ergebnisse liefert auch die Pyrolyse der Maissilage (2475). Bei Triticale-Ganzpflanze (2471) treten die Effekte erst beim Übergang zu den hohen untersuchten Aufheizraten ein. Die thermische Zersetzung des Sägerestholzes (2276) führt mit steigender Aufheizgeschwindigkeit ebenfalls zu einer Erhöhung an Kondensat (Teer/Öl ⇧, Zersetzungswasser ⇩), wobei sowohl eine geringere Koks- als auch Gasmenge entsteht.

Pyrolysegaszusammensetzung

Vergleicht man die Gasausbeuten der Hauptgaskomponenten bei der Weizenstrohpyrolyse bei höheren Aufheizraten (> 60 K/min) mit denen bei tieferen Aufheizraten (< 25 K/min) lässt sich feststellen, dass eine Abnahme bei CO, CO_2, CH_4 und H_2 auftritt (s. Abbildung 4-22). Zwischen 5 und 12 K/min kommt es bei 500 °C zu einem Anstieg der Hauptgaskomponenten, wohingegen bei 400 °C eher ein Abfall eintritt. Eine weitere Erhöhung der Aufheizrate auf 20 K/min bringt nur für Wasserstoff einen Effekt mit sich.

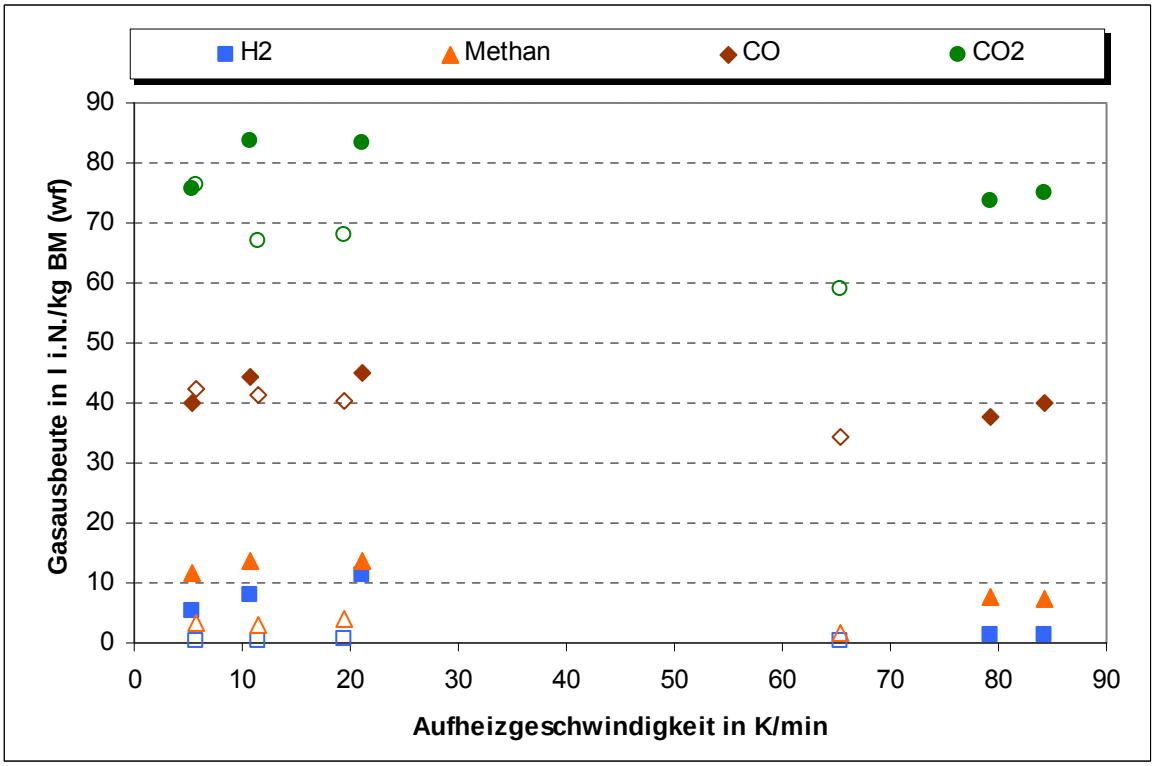


Abbildung 4-22: Einfluss der Aufheizgeschwindigkeit auf die Ausbeute der Hauptgaskomponenten bei der Pyrolyse von Weizenstroh (2275) bei 400 und 500 °C im Festbettreaktor *(Legende: 400 °C … Symbole mit Umrandung; 500 °C … ausgefüllte Symbole)*

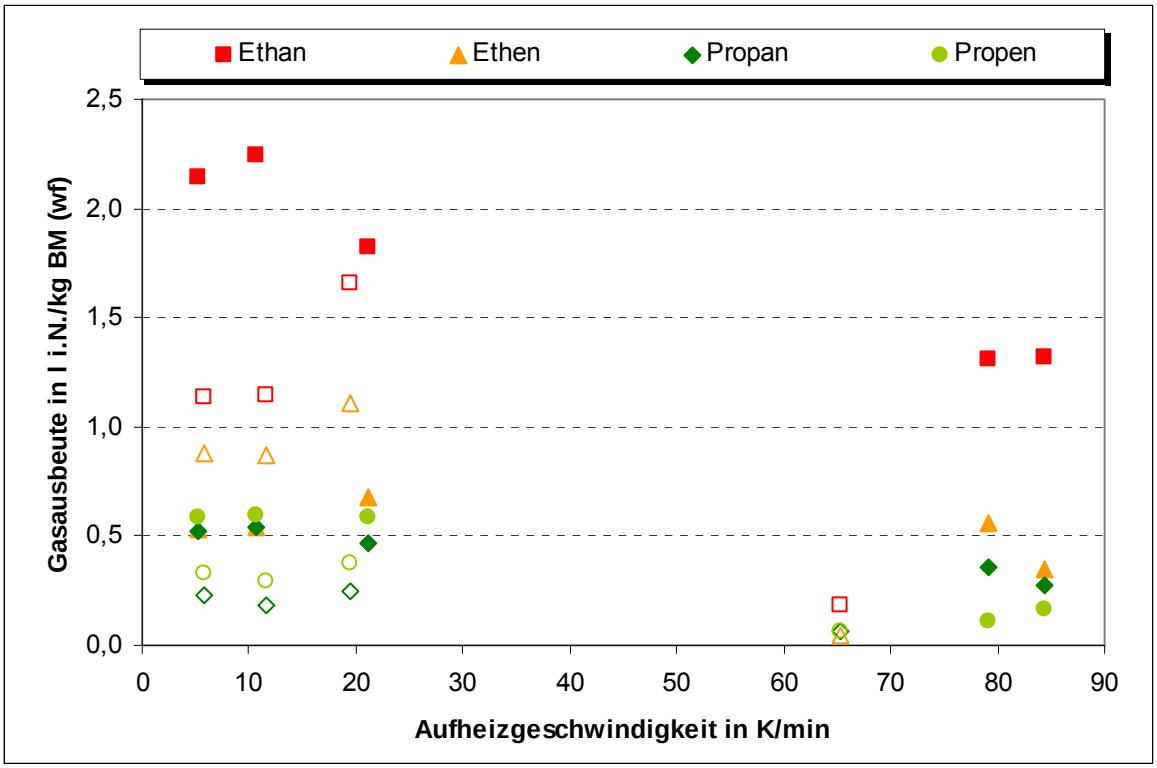


Abbildung 4-23: Einfluss der Aufheizgeschwindigkeit auf die Ausbeute der gasförmigen Kohlenwasserstoffe bei der Pyrolyse von Weizenstroh (2275) bei 400 und 500 °C im Festbettreaktor *(Legende: 400 °C … Symbole mit Umrandung; 500 °C … ausgefüllte Symbole)*

Bei den C2- und C3-Kohlenwasserstoffen gehen die Ausbeuten ebenfalls zurück (s. Abbildung 4-23), wobei zwischen 10 und 20 K/min ein deutlicher Anstieg bei Ethen (400, 500 °C) und Ethan (400 °C) bzw. ein Abfall bei Ethan (500 °C) auftreten. Dies lässt einen Verlauf der Kohlenwasserstoffe in Abhängigkeit von der Aufheizrate mit Maximum im Bereich zwischen 30 und 40 K/min erahnen. Ähnliche Trends lassen sich auch für die Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde) finden (s. Anhang F Abb Anhang F-5, Abb Anhang F-6).

Kokszusammensetzung

Eine Beeinflussung der Kokszusammensetzung ist im Bereich bis 25 K/min kaum festzustellen (s. Abbildung 4-24, Abbildung 4-25). Unterschiede treten lediglich zwischen einer sehr langsamen Aufheizung (< 25 K/min) und einer schnelleren (65…90 K/min) auf. Hier ergeben sich für eine Pyrolysetemperatur von 500 °C ein Abfall des Gehalts an fixem Kohlenstoff sowie Kohlenstoff aus der Elementaranalyse und eine Zunahme des Flüchtigenanteils (+5 Ma.-%, wf) sowie des Sauerstoffgehalts. Die Anteile an Wasserstoff und Stickstoff bleiben annähernd unverändert. Eine Variation der Aufheizrate bei der Pyrolyse von Weizenstroh bei 400 °C hat keinen signifikanten Einfluss auf die Kokszusammensetzung. Ähnliche Effekte konnten auch für die Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) festgestellt werden (s. Abb Anhang F-3, Abb Anhang F-4).

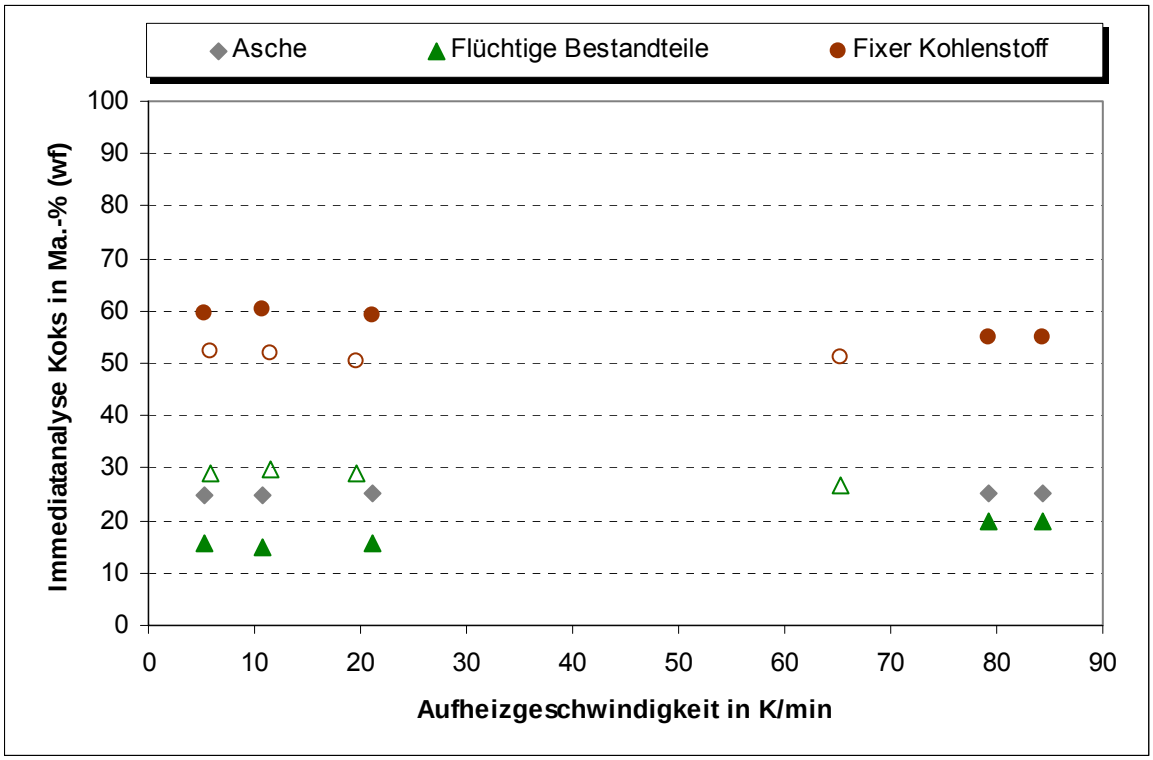


Abbildung 4-24: Einfluss der Aufheizgeschwindigkeit auf die Immediatanalyse des Kokses bei der Pyrolyse von Weizenstroh (2275) bei 400 und 500 °C im Festbettreaktor *(Legende: 400 °C … Symbole mit Umrandung; 500 °C … ausgefüllte Symbole)*

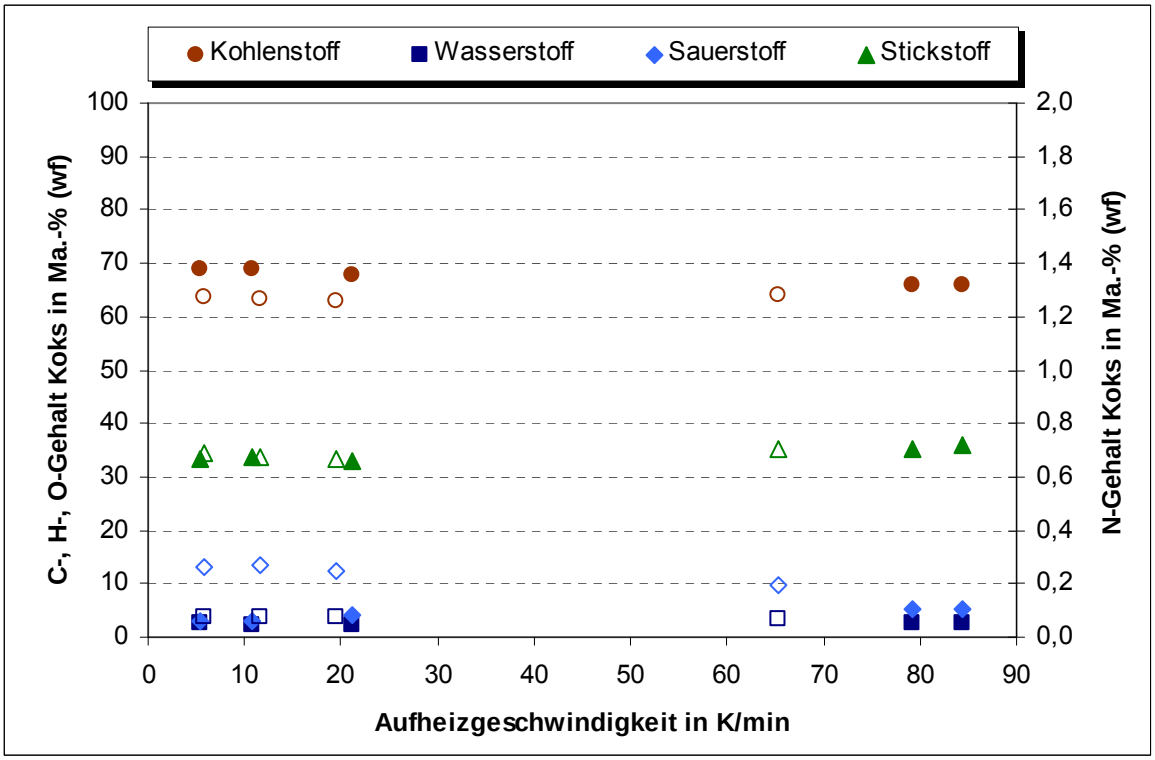


Abbildung 4-25: Einfluss der Aufheizgeschwindigkeit auf die Elementarzusammensetzung des Kokses bei der Pyrolyse von Weizenstroh (2275) bei 400 und 500 °C im Festbettreaktor *(Legende: 400 °C … Symbole mit Umrandung; 500 °C … ausgefüllte Symbole)*

Teer/Öl-Zusammensetzung

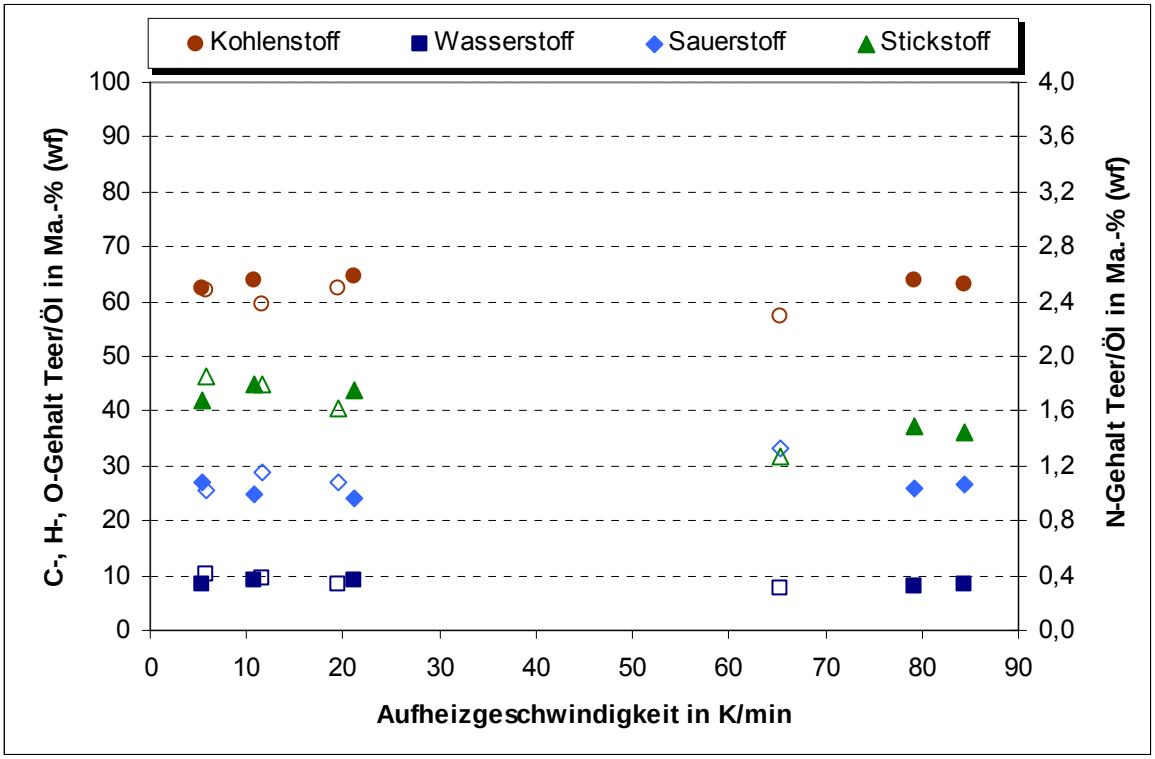


Abbildung 4-26: Einfluss der Aufheizgeschwindigkeit auf die Teer/Öl-Zusammensetzung bei der Pyrolyse von Weizenstroh (2275) bei 400 und 500 °C im Festbettreaktor *(Legende: 400 °C … Symbole mit Umrandung; 500 °C … ausgefüllte Symbole)*

Die Auswirkungen auf die Elementarzusammensetzung des Teer/Öls sind analog zu denen des Kokses gering (s. Abbildung 4-26). Es ist lediglich ein leichter Anstieg des Kohlenstoff- und Abfall des Sauerstoffgehaltes bis 25 K/min ersichtlich, wobei die Werte bei erreichen höherer Aufheizraten (> 65 K/min) wieder abnehmen (Kohlenstoff) bzw. zunehmen (Sauerstoff). Der Anteil an Stickstoff, der im Teer/Öl gebunden wird, nimmt mit steigender Aufheizgeschwindigkeit ebenfalls ab. Ähnliche Trends ergeben sich auch bei der Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde) (s. Abb Anhang F-7), Sägerestholz (Fichte, rindenfrei) und Triticale-Ganzpflanze (Ausnahme: Stickstoffgehalt ⇧).

Verteilung der chemisch gebundenen Energie

Da sich die Produktzusammensetzungen kaum verändern, ist der Einfluss der Aufheizrate auch bei den Energieinhalten gering. Effekte ergeben sich beim Pyrolysegas, dessen Ausbeute und Brennwert abnimmt (-23 % ggü. 5 K/min), da weniger energiereiche Kohlenwasserstoffe freigesetzt werden. Bei Teer/Öl tritt bei höheren Aufheizraten (> 65 K/min) infolge des verringerten Kohlenstoff- und erhöhten Sauerstoffgehaltes ebenfalls ein Abfall des Brennwertes ein. Dieser wird jedoch durch die Ausbeutesteigerung kompensiert, so dass insgesamt ein höherer Anteil der im Weizenstroh chemisch gebundenen Energie auf dieses Produkt übergeht (s. Abbildung 4-27). Insgesamt wird bei der Weizenstrohpyrolyse bei 500 °C ein geringerer Anteil der im Einsatzstoff chemisch gebundenen Energie in den Pyrolyseprodukten fixiert. Dies deutet darauf hin, dass exotherme Reaktionen die ablaufenden Mechanismen dominieren. Ein eindeutiger Trend der Differenz der Brennwerte zwischen Produkten und Edukt in Abhängigkeit von der Aufheizrate lässt sich jedoch nicht finden. Die Werte liegen im Bereich zwischen -500 und -900 kJ/kg (wf). Bei 400 °C sind die gleichen Auswirkungen der Aufheizrate auf die Energieinhalte feststellbar (s. Abb Anhang F-1).

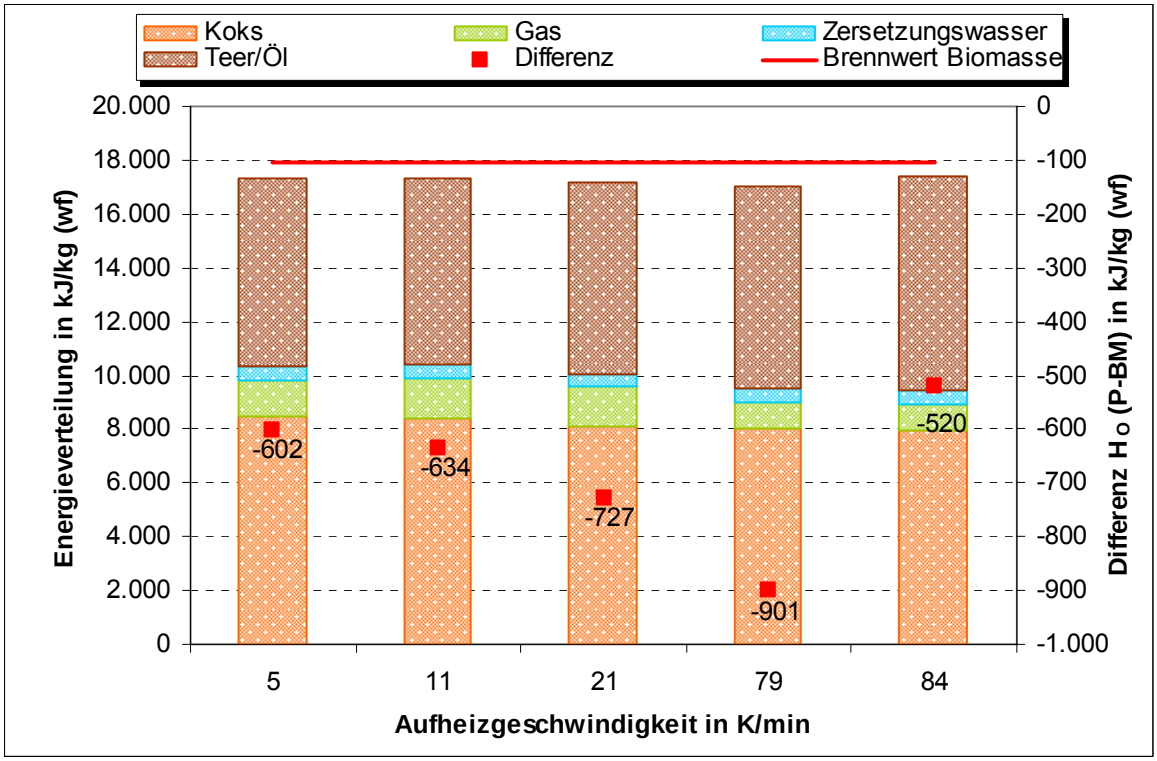


Abbildung 4-27: Einfluss der Aufheizgeschwindigkeit auf die Energieverteilung bei der Pyrolyse von Weizenstroh (2275) bei 500 °C im Festbettreaktor

Bei Betrachtung der „Reaktionsenthalpien“ der anderen Einsatzstoffe lässt sich mit steigender Aufheizrate ein Rückgang der Exothermie für Waldrestholz (s. Abb Anhang F-8, Abb Anhang F-9), Maissilage, Triticale-Ganzpflanze und eine Zunahme der Endothermie beim Sägerestholz feststellen. Dieser Trend würde die Aussage untermauern, dass die endothermen Wärmetönungen hauptsächlich auf die Flüchtigenentbindung zurückzuführen sind und die exothemen Reaktionsenthalpien aus den primären Koksbildungsreaktionen resultieren.

Der Einfluss der Aufheizgeschwindigkeit auf die Produktverteilung und -zusammensetzung bei der Biomassepyrolyse ist verglichen mit dem der Temperatur wesentlich geringer. Generell lassen sich die folgenden Auswirkungen festhalten, wobei teilweise kleinere Abweichungen bei Einsatz anderer Biomassen auftreten können. Zur Klärung der genauen Mechanismen sind weitere Untersuchungen insbesondere unter Berücksichtigung der Stoffgruppen der Einsatzstoffe notwendig. Die detaillierten Ergebnisse sind Anhang F zu entnehmen.

- Produktverteilung:
  - Anstieg der Kondensatausbeute infolge schnellerer Überwindung des Temperaturbereichs in dem die Flüchtigenentbindung stattfindet, dadurch kürzere Verweilzeit der flüchtigen Bestandteile im Partikel und somit Hemmung von sekundären Pyrolysereaktionen zwischen Feststoff und den gasförmigen Kohlenwasserstoffen;
  - Abnahme der Koksausbeute (weniger deutlich bei 400 °C) infolge der Hemmung der Koksbildungsreaktionen (z. B. Dehydratation zu Anhydrocellulose), die im allgemeinen sehr langsam ablaufen;
  - Anstieg der Teer/Öl-Ausbeute durch Begünstigung von Depolymerisationsreaktionen der Cellulose und der Flüchtigenentbindung;
  - geringer Einfluss auf die Zersetzungswasserausbeute;
  - Abnahme der Gasausbeute durch Hemmung sekundärer Spaltreaktionen der längerkettigen Kohlenwasserstoffe bzw. kein Einfluss im Bereich zwischen 5 und 25 K/min bei Temperaturen ab 500 °C
  - Bei der Pyrolyse von Weizenstroh und Triticale-Ganzpflanze ergibt sich im Bereich zwischen 5 und 25 K/min kein Einfluss der Aufheizgeschwindigkeit.
- Produktzusammensetzung:

  Koks
  - Anstieg des Aschegehaltes infolge Anreicherung der mineralischen Komponenten im Feststoff (Verringerung der Koksausbeute);
  - Anstieg des Anteils an Flüchtigen Bestandteilen und folglich Abnahme des Gehaltes an fixem Kohlenstoff und an elementarem Kohlenstoff;
  - Zunahme des Sauerstoffanteils bei einer Pyrolysetemperatur von 500 °C, wohingegen bei 400 °C keine Einfluss auftritt;
  - kein signifikanter Einfluss auf den Wasserstoffgehalt;

- Zunahme des Stickstoffgehaltes, wobei der größte Einfluss zwischen langsamen (< 25 K/min) und schnellen Aufheizraten (> 65 K/min) auftritt;

Teer/Öl

- abnehmende Gehalte an Kohlenstoff, Wasserstoff und Stickstoff;
- Zunahme des Sauerstoffgehaltes;

Gas

- Abnahme der Ausbeuten an Kohlenwasserstoffen (Methan, Ethan, Ethen, Propan, Propen) sowie der sauerstoffhaltigen Verbindungen (CO und CO_2) und leichte Zunahme des Wasserstoffgehaltes bei der schnelleren Aufheizung (> 65 K/min) verglichen mit der geringen Aufheizrate (< 25 K/min);
- zwischen 5 und 25 K/min Anstieg der Gasausbeuten, lediglich CO_2 und Propan ohne eindeutigen Trend;
- sehr große rohstoffseitige Einflüsse auf die Ausbeuten der Hauptgaskomponenten und die gasförmigen Kohlenwasserstoffe;

- Brennwert der Pyrolyseprodukte
  - Abnahme des Koksbrennwertes infolge des zunehmenden Sauerstoff- und sinkenden Kohlenstoff- (und Wasserstoff-)gehaltes bei Aufheizraten im Bereich zwischen 5 und 25 K/min, bei weiterer Steigerung keine Beeinflussung feststellbar;
  - Abnahme des Gasbrennwertes zwischen den geringen (5…25 K/min) und den höheren Aufheizraten (> 65 K/min) infolge der Verringerung der niedermolekularen Anteile an Kohlenwasserstoffen; im Bereich geringer Aufheizraten teilweise Steigerung des Gasbrennwertes infolge Erhöhung des Kohlenwasserstoff- und Wasserstoffgehalts;
  - Teer/Öl-Brennwert ohne einheitlichen Trend für die untersuchten Biomassen, überwiegend jedoch Verringerung des Energieinhaltes durch zunehmende Sauerstoff- und abnehmende Kohlenstoffgehalte;
  - Abnahme der Exothermie bzw. Zunahme endothermer Reaktionen infolge erhöhter Flüchtigenentbindung und Abnahme der Koksausbeute.

Mögliche Ursachen für die auftretenden Effekte: Eine schnellere Aufheizung bewirkt eine hohe Entbindungsrate der flüchtigen Bestandteile. Die Bindungen im Feststoff werden infolge des höheren verfügbaren Energieangebotes nicht selektiv (zuerst niedrigste Bindungsenergie) gespalten. Durch die hohe Konzentration an Spaltprodukten in der Gasphase ist die Anzahl der möglichen Partner für eine Rekombination wesentlich größer, was in den abnehmenden Kohlenwasserstoffgehalten im Gas resultiert. Dafür werden aber erhöhte Gehalte an höhermolekularen Kohlenwasserstoffen (Teer/Öl) freigesetzt. Die verminderte Bildung an sauerstoffhaltigen Verbindungen (CO und CO_2) im Gas könnte ebenfalls damit zusammenhängen, was auch der höhere Sauerstoffanteil im Teer/Öl zeigt. Andererseits ist es aber auch denkbar, dass andere Spaltreaktionen gegenüber der Decarboxylierung und Decarbonylierung begünstigt ablaufen und somit geringere Anteile an CO und CO_2 gebildet werden. Dies würde auch den höheren Flüchtigen- und Sauerstoffgehalt im Koks erklären.

4.1.5 Einfluss der Verweilzeit bei Pyrolyseendtemperatur

Die Verweildauer der Partikel in der heißen Zone ist ein weiterer Parameter, der das Produktspektrum bei thermochemischen Konversionsprozessen beeinflusst. Die Verweilzeit unterscheidet sich je nach Reaktortyp und kann von wenigen Sekunden (Flugstrom, zirkulierende Wirbelschicht) über wenige Minuten (stationäre Wirbelschicht) bis hin zu einigen Stunden (Wanderbett, Festbett) reichen. Sie ist maßgeblich für den Kohlenstoffumsatz bei Verbrennungs- und Vergasungsprozessen, der möglichst maximiert werden sollte, und beeinflusst die Produktverteilung und -zusammensetzung bei der Pyrolyse. Längere Verweilzeiten (Stundenbereich) spielen insbesondere bei der Holzkohleherstellung (z. B. Degussa-Großraumretorte, 12-18 h) zur Beeinflussung der Eigenschaften der Holzkohle eine Rolle.

Der Einfluss der Verweilzeit auf die Produktausbeuten ist bei niedrigeren Temperaturen (< 400 °C) stärker ausgeprägt (s. Abbildung 4-28). Ursache hierfür ist, dass die Abspaltung der Hauptmenge der flüchtigen Bestandteile zu diesem Zeitpunkt noch nicht abgeschlossen ist. Die Auswirkungen auf die Kondensatausbeute treten insbesondere im Verweilzeitbereich bis 10 min auf (+7,2 %). Dabei steigen sowohl die Ausbeute an Teer/Öl als auch an Zersetzungswasser. Das Verhältnis innerhalb des Flüssigproduktes bleibt hingegen annähernd gleich (ca. 63 Ma.-% Teer/Öl und 37 Ma.-% Zersetzungswasser). Zu diesem Zeitpunkt scheint die Entbindung flüchtiger Verbindungen für diesen Temperaturbereich weitgehend abgeschlossen.

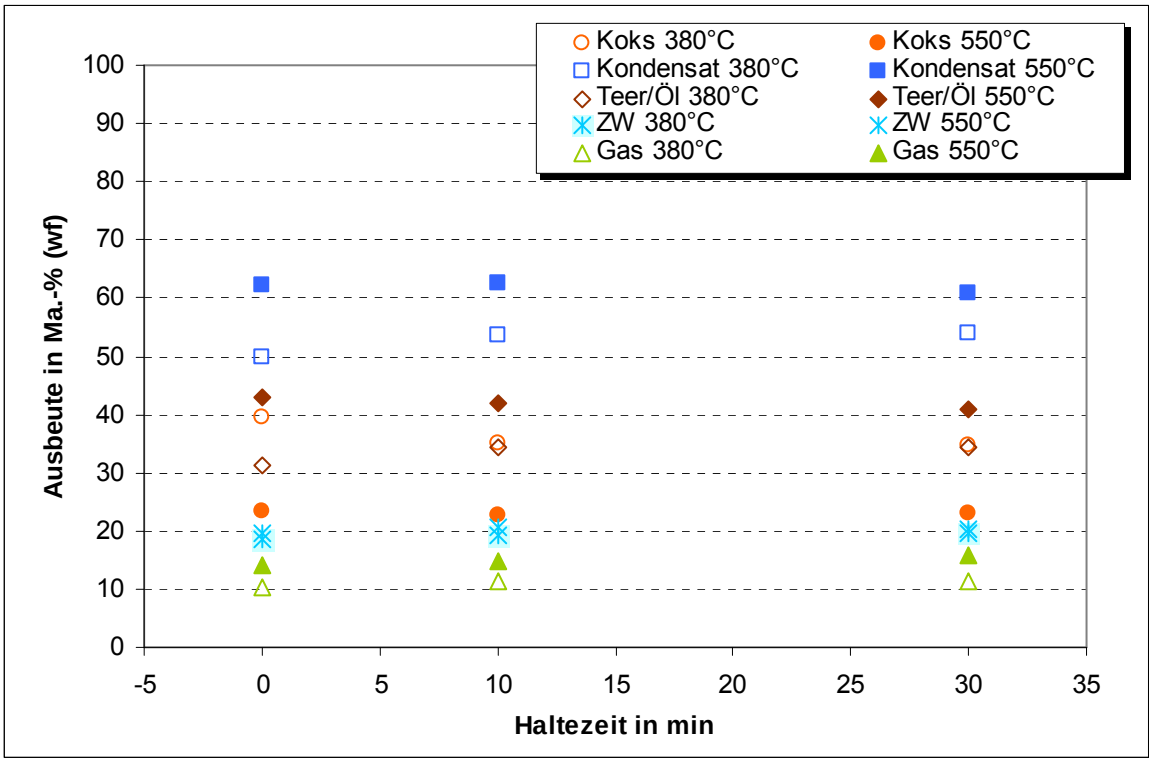


Abbildung 4-28: **Einfluss der Verweilzeit bei Endtemperatur für die Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 380 und 550 °C (Festbett, Schnellaufheizung)**

Jetzt legt dies u. U. den Schluss nahe eine Absenkung der Temperatur mit einer Verweilzeitverlängerung des Feststoffes zu kompensieren, um ähnlich hohe Flüssigproduktausbeuten zu generieren. Dies ist jedoch nur für sehr geringe Temperaturabsen-

kungen möglich. Die Temperatur besitzt einen wesentlich höheren Einfluss auf die Flüssigproduktausbeute als die Verweilzeit, da bei höheren Temperaturen das Energieangebot zur Spaltung von Bindungen deutlich größer ist.

Effekte bezüglich der Koks- und Gasausbeute ergeben sich ebenfalls insbesondere im Verweilzeitbereich bis 10 min. Dabei nimmt die Koksausbeute infolge der fortschreitenden Zersetzung ab (-11,2 %) und die Gasausbeute zu (+7,4 %).

Bei 550 °C ist die Entbindung der flüchtigen Bestandteile weitestgehend abgeschlossen. Ein signifikanter Einfluss der Verweilzeit des Feststoffes auf die Ausbeuten ergibt sich insbesondere bei Verweilzeiten von 30 min. Die Koksausbeute nimmt bei einer Erhöhung der Verweilzeit von 0 auf 10 min zunächst leicht ab um nachfolgend wieder leicht anzusteigen. Die Kondensatmenge sinkt leicht (abnehmende Teer/Öl-Ausbeute, Zersetzungswasser bleibt gleich) und Gas steigt von 0 bis 30 min kontinuierlich an (15 min: +4,9; 30 min: +12,8 %).

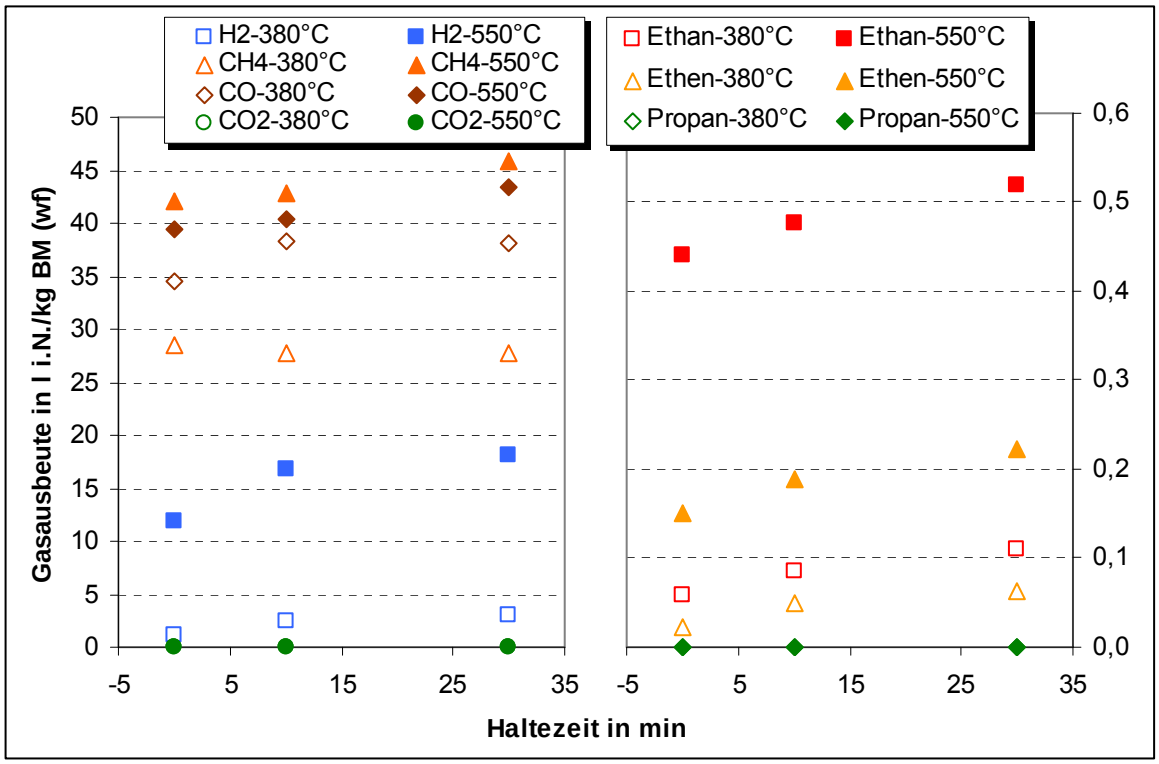


Abbildung 4-29: **Einfluss der Verweilzeit auf die Ausbeuten ausgewählter Gaskomponenten für die Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 380 und 550 °C (Festbett, Schnellaufheizung)**

Der Einfluss der Feststoffverweilzeit im Pyrolyseprozess bei Temperaturen bei denen die Hauptmenge der Flüchtigen Bestandteile bereits freigesetzt ist, besteht im Wesentlichen darin, dass es zu Strukturänderungen in der Koksmatrix kommt, wobei insbesondere Wasserstoff und Methan abgespalten werden (s. Abbildung 4-29). Diese Reaktionen laufen sehr langsam ab und werden durch die längere Verweilzeit bei höheren Temperaturen begünstigt. Die Masseabnahme des Kokses ist dabei jedoch relativ gering. Zudem können insbesondere bei längeren Verweilzeiten (30 min) sekundäre Crackreaktionen der Flüchtigen am Koks auftreten, die mit einer Bildung von Kohlenstoff (Anstieg Koksausbeute), einer Verringerung der Teer/Öl-Ausbeute und einer zunehmenden Gasproduktion einhergehen. Eine Zunahme der Ausbeute mit steigender

Feststoffverweilzeit konnte auch für Ethan und Propan sowie geringfügig für Ethen festgestellt werden (s. Abbildung 4-29). Bezüglich CO und CO_2 ergeben sich keine einheitlichen Trends.

Die Auswirkungen einer Verweilzeitsteigerung auf die Kokszusammensetzung können Abbildung 4-30 entnommen werden. Dabei kommt es sowohl bei Pyrolysetemperaturen von 380 als auch 550 °C zu einer Verringerung des Flüchtigengehaltes (-8,5 bzw. -5,9 Ma.-% wf) bei gleichzeitiger Erhöhung des Anteils an fixem Kohlenstoff (+8,4 bzw. +5,9 Ma.-% wf). Dies zeigt, dass für beide Temperaturen im unteren Verweilzeitbereich die Flüchtigenentbindung noch nicht vollständig abgeschlossen ist. Aus dem Koks werden weiterhin sauerstoffhaltige Verbindungen freigesetzt (Abnahme Sauerstoffgehalt um 2,6 Ma.-% wf). Diese Effekte bewirken weiterhin eine Steigerung des Koksbrennwertes (s. Abbildung 4-31). Auch der Energieinhalt im Gas steigt infolge der erhöhten Entbindung von Wasserstoff und niedermolekularen Kohlenwasserstoffen. Bei Teer/Öl treten für 380 und 550 °C gegenläufige Effekte auf. Bei der tieferen Temperatur steigt der Brennwert mit zunehmender Verweilzeit, bei 550 °C nimmt er leicht ab. Entsprechend verhält sich auch der Kohlenstoffgehalt im Teer/Öl.

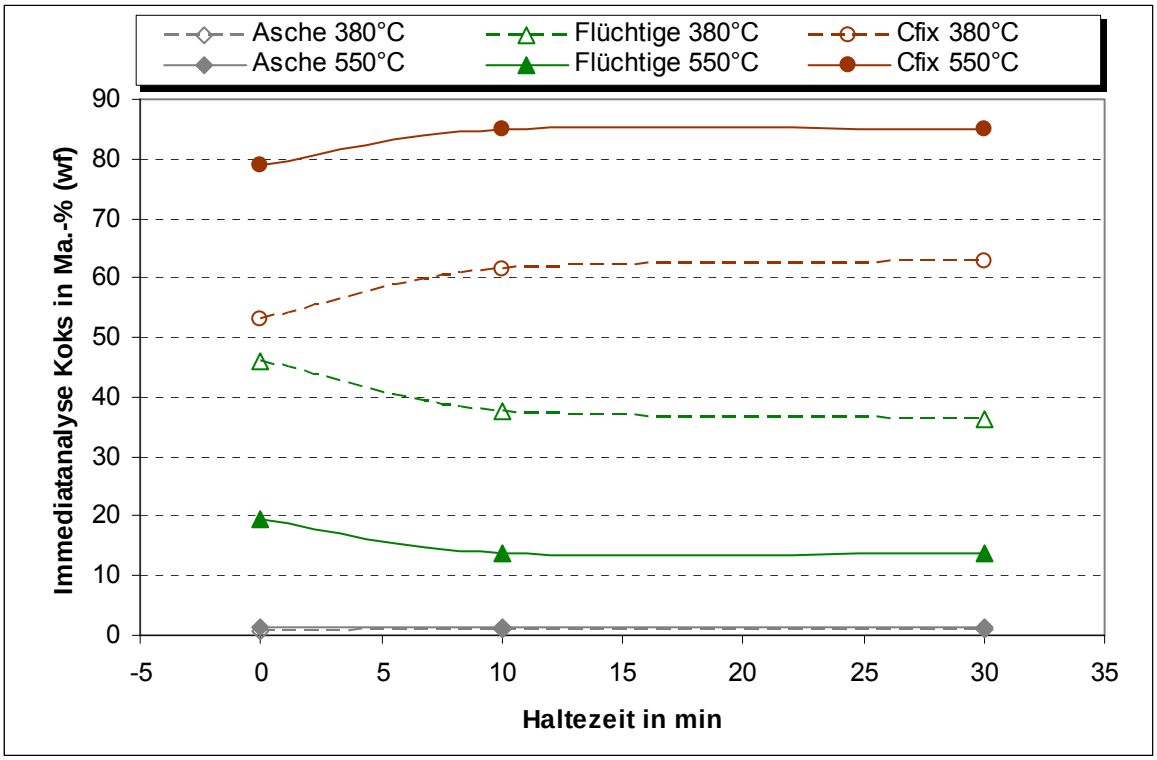


Abbildung 4-30: **Einfluss der Verweilzeit auf die Zusammensetzung des Kokses bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 380 und 550 °C (Festbett, Schnellaufheizung)**

Betrachtet man die „Reaktionsenthalpie“ bei der Pyrolyse des Sägerestholzes (Fichte, rindenfrei) lässt sich in Abhängigkeit von der Verweilzeit bei 380 °C kein eindeutiger Trend ableiten. Die Werte liegen im endothermen Bereich zwischen 544 und 800 kJ/kg (wf). Bei 550 °C ergeben sich ebenfalls endotherme Wärmetönungen, jedoch nehmen die Beträge mit steigender Verweilzeit ab (893 → 722 → 255 kJ/kg wf). Dies bedeutet, dass zunehmend exotherme Reaktionen bei der Pyrolyse auftreten. Beispielsweise besteht die Möglichkeit, dass Rekombinationsreaktionen im Koks stattfinden, die zur Bildung aromatischer Strukturen führen. Durch die Abspaltung von Wasserstoff und/oder

Methan entstehen freie Valenzen am Koks, die mit Teerfragmenten geringer Flüchtigkeit reagieren können und somit unter Wärmefreisetzung eine stabile Struktur bilden. Dies wird durch den leichten Anstieg des Kohlenstoffgehalts im Koks bestätigt.

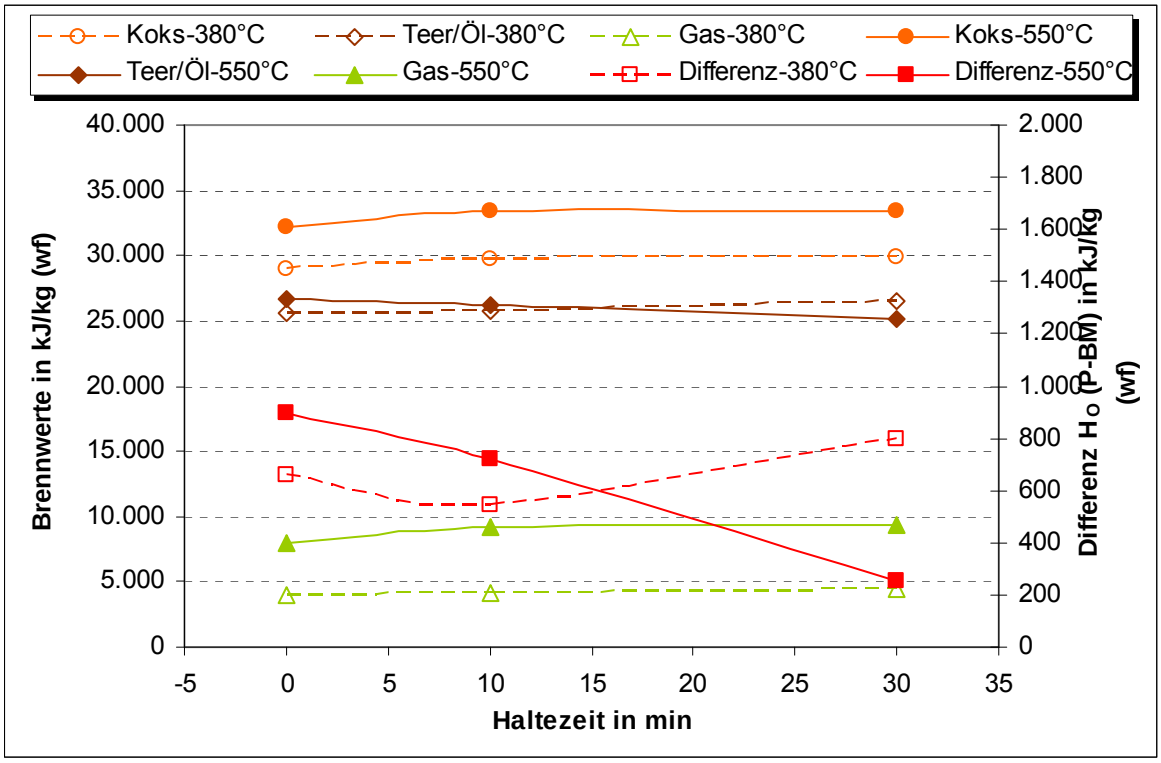


Abbildung 4-31: **Einfluss der Verweilzeit auf die Energieinhalte der Produkte und die „Reaktionsenthalpie“ bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 380 und 550 °C (Festbett, Schnellaufheizung)**

Die detaillierten Ergebnisse der Untersuchungen zum Verweilzeiteinfluss bei der Biomassepyrolyse finden sich in Anhang G.

4.1.6 Einfluss der Brennstoffvorbereitung

Die Brennstoffkonditionierung (z. B. Zerkleinerung, Trocknung) spielt bei Biomassen eine wichtige Rolle im Hinblick auf die Lagerfähigkeit, den Transport und den Einsatz in Anlagen zur thermochemischen Konversion. Die Prozesse, insbesondere der Zerkleinerung, sind meistens sehr kostenintensiv, da Biomassen infolge ihrer faserigen Struktur und der hohen Druckfestigkeit quer zur Faserrichtung (insbesondere bei Holz) einer schneidenen Zerkleinerung bedürfen. Relevante Partikelgrößen für technische Verfahren (Festbett, Wirbelschicht, Flugstrom) reichen von mehreren Zentimetern (Scheite, Hackgut) über wenige Millimeter (Mikrohackgut, Späne) bis hin zu < 1 mm (Staub). Eine Kenntnis des Pyrolyseverhaltens in Abhängigkeit der Partikelgröße ist für die Wahl der Prozessbedingungen somit durchaus interessant.

Der Einfluss der Zerkleinerung (als Brennstoffvorbereitungsschritt) wurde exemplarisch an Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) untersucht. Die Partikelgrößenvariation erfolgte in dem für die Festbettpyrolyseanlage möglichen Korngrößenbereich von ≤ 5 mm, welcher für Wirbelschichtverfahren technisch Anwendung findet. Partikelgrößenklassen zwischen ≤ 1 mm konnten aufgrund des erhöhten Druckverlustes der Versuchsanlage nicht betrachtet werden.

Die Auswirkungen einer Änderung der Partikelgröße auf die Produktverteilung sind in Abbildung 4-32 dargestellt.

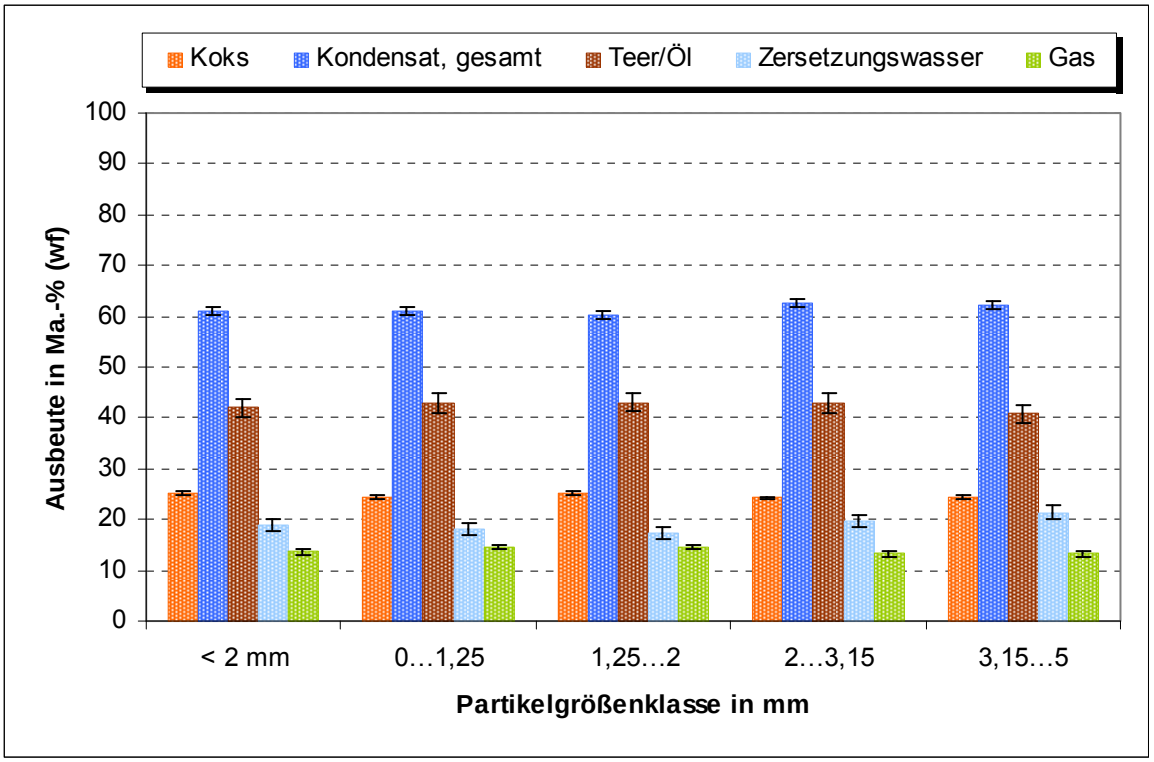


Abbildung 4-32: Einfluss der Partikelgröße auf die Produktverteilung bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 500 °C (Schnellaufheizung)

Im untersuchten Partikelgrößenbereich konnte kein signifikanter Einfluss auf die Produktverteilung von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) festgestellt werden. Dies gilt ebenfalls für die Zusammensetzung der Pyrolyseprodukte Koks, Gas und Teer/Öl sowie deren Energieinhalten. Die Ergebnisse sind zusammenfassend in Anhang H dargestellt.

Generell spielen Effekte unterschiedlicher Korngrößen und -formen bei Wärme- und Stofftransportprozessen eine Rolle. Biomassen weisen sehr schlechte Wärmeleitfähigkeiten auf, die sich quer zur oder in Faserrichtung unterscheiden. Dadurch können innerhalb eines Partikels größere Temperaturgradienten auftreten. Dies kann in Abhängigkeit der gewählten Prozessbedingungen zur Begünstigung sekundärer Pyrolysereaktionen und somit zu einer Verschiebung der Produktausbeuten führen. Da sich der Partikelkern insbesondere bei hohen Aufheizraten wesentlich langsamer erwärmt, kommen die dort entbundenen flüchtigen Bestandteile mit dem bereits abreagierten Feststoff (Koks) in Kontakt und werden dadurch zu kurzkettigeren Molekülen oder Gasen gespalten.

In der Literatur finden sich meist Untersuchungen zum Pyrolyseverhalten, die sich auf Fraktionen < 2 mm beziehen /Demirbas2006/, /Haykiri-Acma2006/, /Aguiar2008/, /Shen2009/. Bei Partikelgrößen über 1,5 mm werden erst bei Temperaturen ab 700 °C und besonders bei hohen Aufheizraten Änderungen der Koksausbeute sichtbar /Asadullah2009/. Alle Arbeiten bestätigen einen Anstieg der Koks- und Gasausbeute sowie ein Absinken der Teer/Öl-Ausbeute. Unterhalb von 1,4 mm können dabei durchaus Änderungen in der Koksausbeute von ca. 25 % auftreten /Demirbas2006/,

/Shen2009/. Eine deutliche Veränderung der der Bioölqualität konnte für die Pyrolyse von Holz (Mallee-Eukalyptus) bei 500 °C in der stationären Wirbelschicht ebenfalls nur bei Partikelgrößen < 2 mm festgestellt werden /Shen2009/. Hier kommt es mit steigender Partikelgröße zu einer Abnahme sehr flüchtiger organischer Verbindungen (wie Hydroxyacetaldehyd, Ameisensäure, Methanol), Phenolen und Furanen, Zuckern (wie Levoglucosan) und schwereren oligomeren Bruchstücken. Der Anteil an Zersetzungswasser und ähnlichen Verbindungen, wie niedermolekularen organischen Säuren hingegen steigt. Die Koksstruktur unterliegt bei sehr hohen Aufheizraten ebenfalls gewissen Veränderungen. So erhöht sich der amorphe Anteil und es entstehen hauptsächlich aromatische Systeme mit 3 bis 5 Ringen /Asadullah2009/.

Die detaillierten Ergebnisse zum Partikelgrößeneinfluss bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) sind Anhang H zu entnehmen.

4.1.7 Einfluss des Mischungsverhältnisses

Untersuchungen zum Pyrolyseverhalten von Mischungen aus verschiedenen Biomassen können aus mehreren unterschiedlichen Gesichtspunkten relevant sein. Zum Einen aus Verfügbarkeitsgründen, da es insbesondere für die landwirtschaftlichen Biomassen begrenzte Erntezeiträume gibt und somit eine ganzjährige Verfügbarkeit für Energieanlagen nur mit einem erhöhten logistischen und Kostenaufwand (z. B. für die Lagerung) zu realisieren ist. Der 2. Aspekt ergibt sich daraus, dass durch Brennstoffmischungen eine Beeinflussung von bei der thermochemischen Konversion relevanten Eigenschaften erfolgen kann. Beispielhaft sind hier die Verringerung von anfallenden Aschemengen oder die Veränderung des Ascheerweichungs- und -fließverhaltens zu nennen. Außerdem ist anzumerken, dass bei der Umsetzung von Biomassemischungen infolge ihrer unterschiedlichen Stoffgruppenzusammensetzung Synergieeffekte auftreten können, die die Produktverteilung und die -zusammensetzung verglichen mit der Konversion der einzelnen Einsatzstoffe beeinflussen. Um das Auftreten von Synergieeffekten feststellen zu können, werden die ermittelten Ausbeuten mit den über die Mischungsregel aus dem Verhalten der einzelnen Rohstoffe und dem Mischungsverhältnis ermittelten Werten verglichen. Liegt die Abweichung der Werte dabei außerhalb des zugrunde gelegten Fehlerintervalls, können Wechselwirkungen angenommen werden. Ist dies nicht der Fall, dann wird von rein additivem Verhalten gesprochen. Wechselwirkungen müssen dabei nicht über den gesamten Bereich der Zumischrate auftreten.

Die Resultate zum Einfluss von Biomassemischungen auf die Pyrolyse werden nachfolgend exemplarisch am Beispiel Waldrestholz (Fichte mit Rinde)/Weizenstroh erläutert. Die Ergebnisse zum Pyrolyseverhalten der anderen Mischungen finden sich in Anhang I. In den nachfolgenden Abbildungen werden der Verlauf nach dem additiven Verhalten gestrichelt und die experimentell bestimmten Werte als Datenpunkte dargestellt. Abbildung 4-33 zeigt zunächst die Auswirkungen auf die Produktverteilung unter Angabe der Fehlerintervalle. Signifikante Abweichungen vom additiven Verhalten treten bei Gas für alle untersuchten Zumischraten auf (+3,6…+6,5 %), wobei der höchste Wert bei 50 Ma.-% Weizenstroh erreicht wird. Die Erhöhung der Gasausbeute ergibt sich bei Zumischraten zwischen 0 und 50 Ma.-% zuungunsten der Kondensatausbeute

(-1,9…-3,3 %), wobei ebenfalls ein leichter Anstieg der Koksausbeute (+0,7…+1,4 %) festzustellen ist.

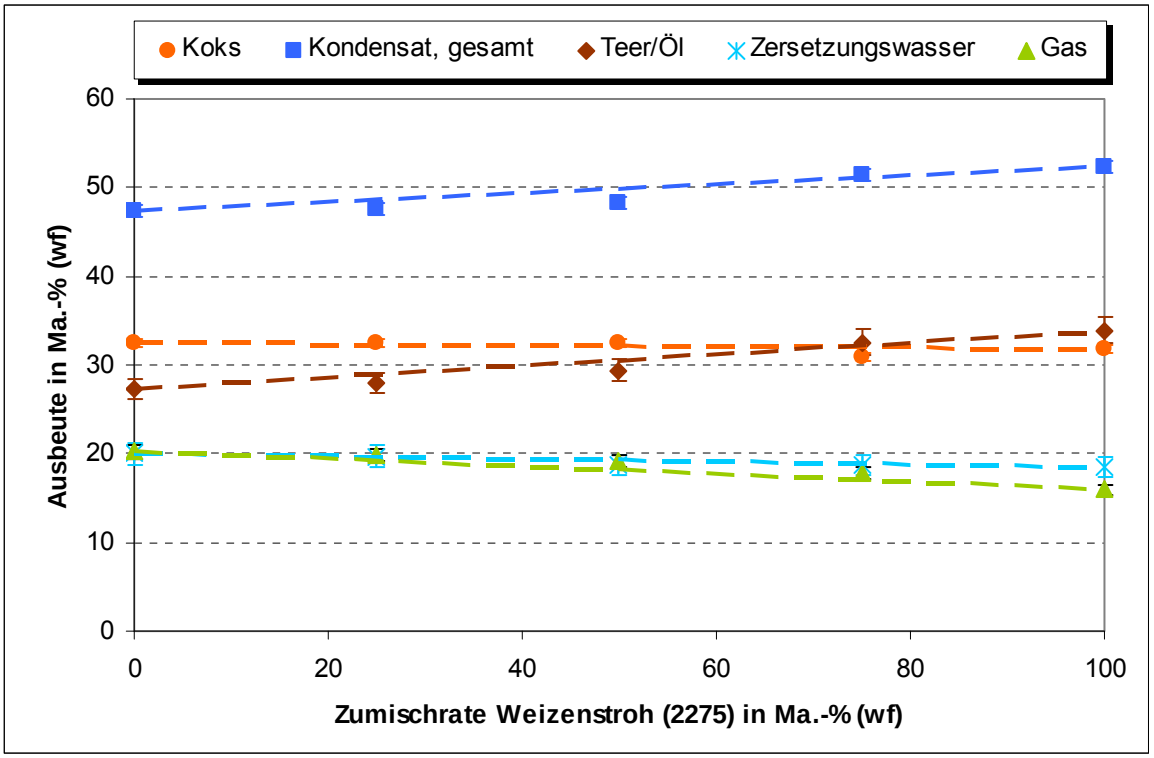


Abbildung 4-33: Produktverteilung in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis bei der Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) und Weizenstroh (2275) im Festbett bei 500 °C mit Schnellaufheizung *(gestrichelte Linien … über Mischungsregel berechnete Ausbeuten)*

Höhere Zumischraten an Weizenstroh bewirken hingegen eine Abnahme der Koksausbeute (-3,3 %). Diese Effekte deuten auf das Ablaufen von sekundären Reaktionen bei der Pyrolyse zwischen den entbundenen flüchtigen Bestandteilen und/oder zwischen Flüchtigen und Koks hin. Dabei werden längerkettige Kohlenwasserstoffe zu kleineren Bruchstücken gespalten und es kommt zur Kohlenstoffneubildung am Koks über freie Radikale. Eine Betrachtung der Ausbeuten der Gaskomponenten ist in diesem Zusammenhang sinnvoll. Weiterhin ist es auch denkbar, dass Wechselwirkungen bei den primären Reaktionen zur Koksbildung zwischen den beiden Biomassen Waldrestholz und Weizenstroh auftreten. Um dies zu belegen, wären jedoch Strukturuntersuchungen der Kokse notwendig, die nicht Teil des Projektes waren.

Bei den Ausbeuten der Gaskomponenten (bzw. der Gaszusammensetzung) ergeben sich teils deutliche Abweichungen vom rein additiven Verhalten (s. Abbildung 4-34 und Abbildung 4-35). Zur Verdeutlichung der Effekte sind jeweils die Fehlerintervalle für die jeweiligen Reihen in das Diagramm eingetragen.

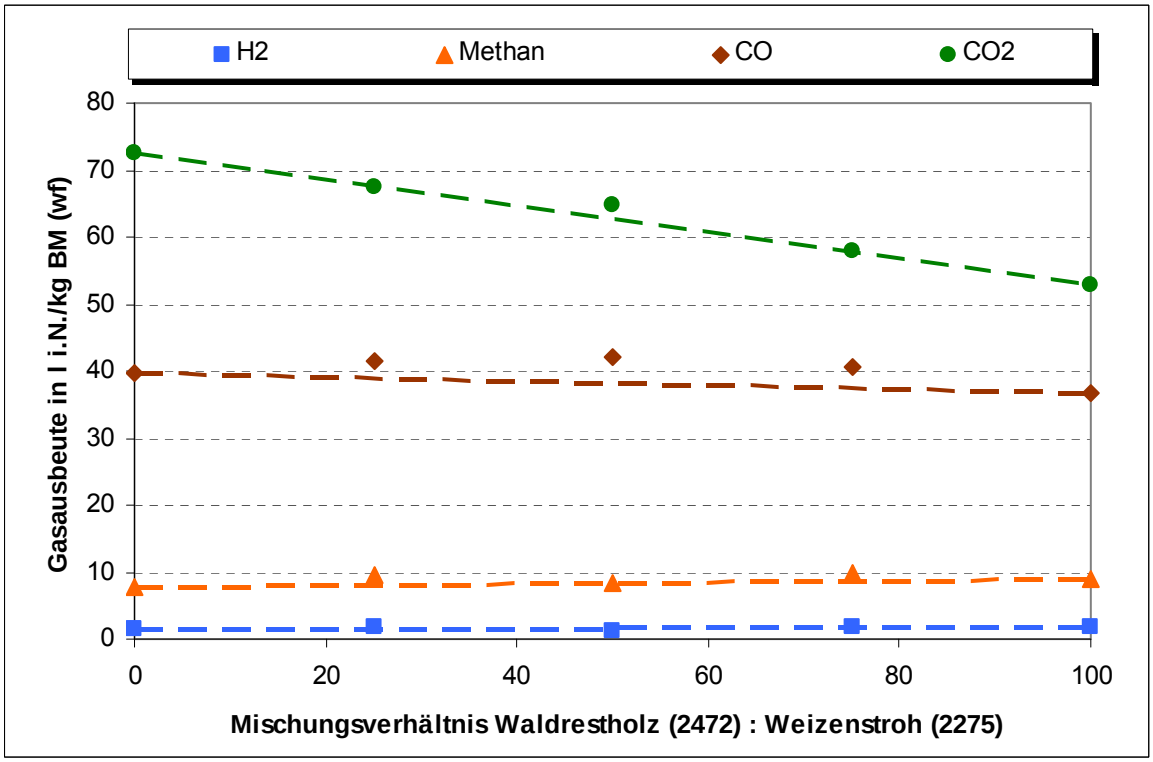


Abbildung 4-34: Ausbeuten der Hauptgaskomponenten in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis bei der Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) und Weizenstroh (2275) im Festbett bei 500 °C mit Schnellaufheizung *(gestrichelte Linien … über Mischungsregel berechnete Ausbeuten)*

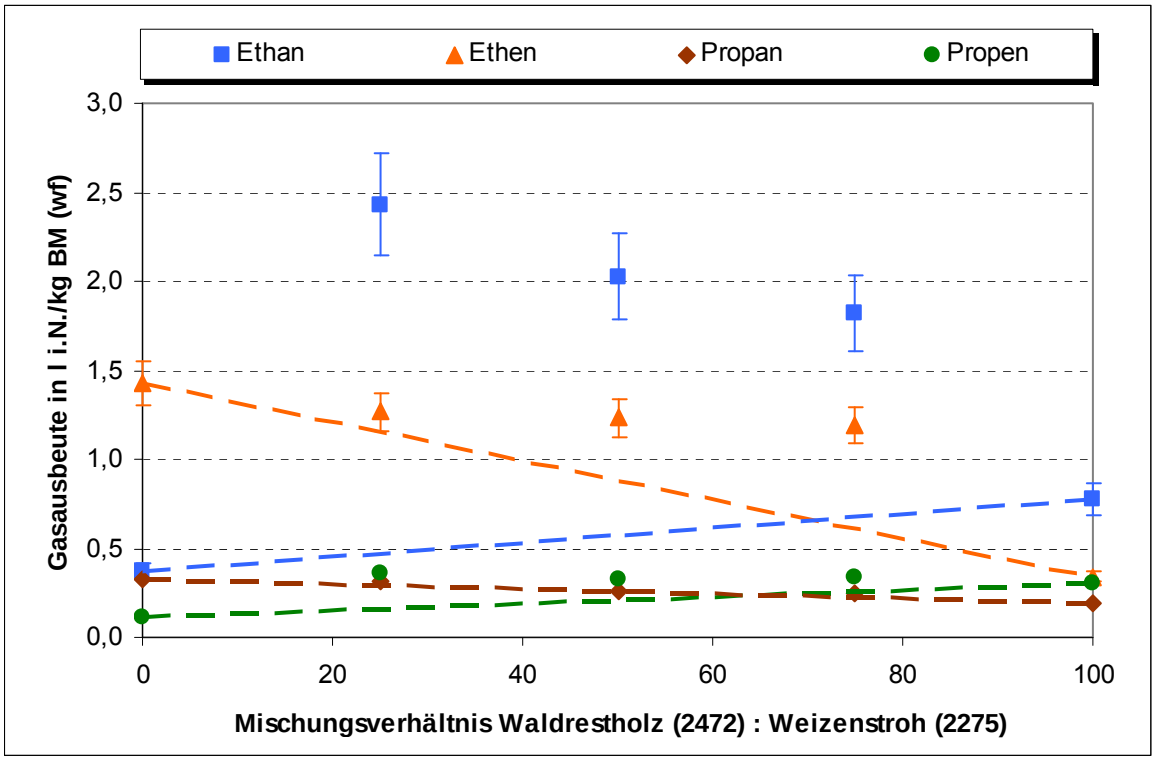


Abbildung 4-35: Ausbeuten der C2- und C3-Kohlenwasserstoffe in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis bei der Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) und Weizenstroh (2275) im Festbett bei 500 °C mit Schnellaufheizung *(gestrichelte Linien … über Mischungsregel berechnete Ausbeuten)*

Bei den Hauptgaskomponenten liegt die Ausbeute an Kohlenmonoxid bei Zumischungsraten von 25 bis 75 Ma.-% Weizenstroh über den mit der Mischungsregel berechneten Werten (+6…11 %). Die Methanausbeute zeigt bei 25 und 75 Ma.-% Weizenstroh eine leichte Erhöhung (+12…16 %), wohingegen bei Wasserstoff und 50 Ma.-% Weizenstroh eine Abnahme (-27 %) zu erkennen ist. Signifikant ist ebenfalls der Effekt bei den Ausbeuten an C2-Kohlenwasserstoffen Ethan und Ethen (s. Abbildung 4-35), die deutlich über den Werten der Mischungsregel liegen (Ethan: +148…343 %; Ethen: +12…168 %). Bei Propan folgt der Verlauf der Ausbeute in Abhängigkeit der Zumischrate der Mischungsregel. Für Propen ergeben sich zwar Abweichungen, diese liegen jedoch aufgrund des relativ großen Fehlers bei der Bestimmung im definierten Fehlerintervall, so dass eine Interpretation möglicherweise falsche Rückschlüsse liefert.

Die Ergebnisse der Immediatanalyse des Kokses zeigen, dass bei Zumischraten von 25 und 75 Ma.-% Weizenstroh eine Erhöhung des Gehaltes an fixem Kohlenstoff (+1,5…+3,5 %) verbunden mit einer Abnahme des Anteils an flüchtigen Bestandteilen (-6,4…-9,6 %) auftritt. Unter Einbeziehung der Elementarzusammensetzung des Kokses fällt jedoch eine Abnahme des Kohlenstoff- (-1,5 %) und Wasserstoffgehaltes (-6,8 %) ggü. dem additiven Verhalten bei Zumischraten bis 50 Ma.-% Weizenstroh und eine Zunahme des Sauerstoffgehaltes (+12,5 %) auf. Bei der Teer/Öl-Zusammensetzung sind die Abweichungen eher gering und nicht signifikant (Kohlenstoff: +0,6…+1,1 %; Wasserstoff: -1,1…+3,2 %; Sauerstoff: -1,4…-2,3 %).

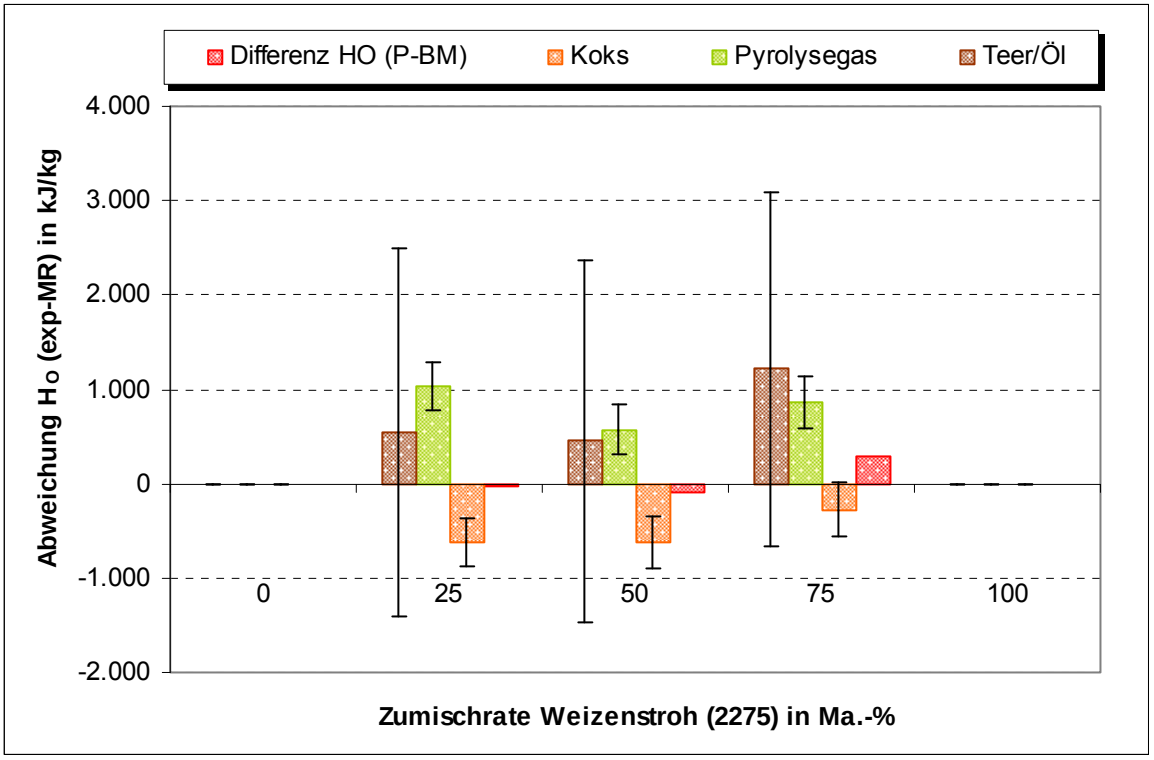


Abbildung 4-36: Abweichung der experimentell bestimmten Brennwerte (exp) von den mit der Mischungsregel berechneten Werten (MR) in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis bei der Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) und Weizenstroh (2275) im Festbett bei 500 °C mit Schnellaufheizung

Der Einfluss auf die Brennwerte der Pyrolyseprodukte ist in Abhängigkeit der Zumischrate an Weizenstroh in Abbildung 4-36 verdeutlicht. Signifikante Abweichungen ergeben sich im gesamten Bereich beim Gasbrennwert (+9,6…+16,7 %). Der Anstieg ist mit der vermehrten Entbindung der energiereichen Komponenten Ethan und Ethen verbunden. Bis 50 Ma.-% Weizenstrohzumischung liegt der Brennwert des Koks ggü. der Mischungsregel niedriger, was in den geringern Kohlenstoff- und Wasserstoffgehalten begründet liegt. Für Teer/Öl ist zwar tendenziell eine Erhöhung des Brennwertes ersichtlich, das Fehlerintervall zeigt jedoch, dass diese nicht signifikant ist.

In den nachfolgenden Tabellen (Tabelle 4-4 bis Tabelle 4-7) sind die Effekte bei der Pyrolyse von Biomassemischungen in Bezug auf das rein additive Verhalten der Einsatzstoffe nach der Mischungsregel dargestellt. Die Erklärung zu den verwendeten Symbolen ergibt sich wie folgt:

- ⇧ … Werte ggü. der Mischungsregel signifikant erhöht
- ⇩ … Werte ggü. der Mischungsregel signifikant erniedrigt
- ⇨ … kein Effekt ggü. der Mischungsregel
- **ja** … Einfluss vorhanden, kein stetig positiver bzw. negativer Trend in Abhängigkeit der Zumischrate
- **?** … Einfluss erkennbar, jedoch im Fehlerbereich

Bezüglich der Produktverteilung (s. Tabelle 4-4) konnten für alle untersuchten Mischungen Abweichungen vom additiven Verhalten festgestellt werden. Diese ergeben jedoch mit Ausnahme des Pyrolysegases keinen stetigen Trend in Abhängigkeit der Zumischrate. Die Ausbeute an Pyrolysegas zeigt sich dabei ggü. der Mischungsregel signifikant erhöht. Dies legt nahe die Ausbeuten der einzelnen Gaskomponenten (s. Tabelle 4-5) bzw. die Gaszusammensetzung näher zu betrachten.

Tabelle 4-4: **Einfluss verschiedener Biomassemischungen auf die Produktverteilung bei der Pyrolyse** *(Pyrolysebedingungen: Festbett, 500 °C, Schnellaufheizung);* **Abweichung zum additiven Verhalten (MR)**

Einsatzstoffe	Waldrestholz/ Weizenstroh	Waldrestholz/ Grünschnittroggensilage	Sägerestholz/ Maissilage
Koks	**ja**	**ja**	**ja**
Kondensat, gesamt	**ja**	**ja**	**ja**
Teer/Öl	**?**	⇩**?**	**?**
Zersetzungswasser	⇨	⇧**?**	**?**
Gas	⇧	⇧	⇧

Hier zeigt sich ein signifikanter Anstieg in den Ausbeuten von Ethan und Ethen (Ausnahme: Sägerestholz/Maissilage). Auch Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Wasserstoff und Methan lassen signifikante Veränderungen erkennen, die für die verschiedenen Gemische jedoch sehr unterschiedlich ausfallen können. Bezieht man hierzu noch die Elementarzusammensetzung des Pyrolysegases (s. Tabelle 4-6) ein, wird deutlich, dass bei den Mischungen mit Waldrestholz der Kohlenstoff- und Wasserstoffgehalt ansteigen, während der Sauerstoffanteil abnimmt. Dies hat gleichzeitig den Effekt der Erhöhung des Gasbrennwertes (s. Tabelle 4-5).

Tabelle 4-5: **Einfluss verschiedener Biomassemischungen auf die Ausbeute der Gaskomponenten bei der Pyrolyse** *(Pyrolysebedingungen: Festbett, 500 °C, Schnellaufheizung);* **Abweichung zum additiven Verhalten (MR)**

Einsatzstoffe	Waldrestholz/ Weizenstroh	Waldrestholz/ Grünschnittroggensilage	Sägerestholz/ Maissilage
H2	**ja**	⇧	⇩
Methan	**ja**	**ja**	**ja**
CO	⇧	**ja**	⇧
CO2	**?**	⇧	⇧**?**
Ethan	⇧	⇧	⇧
Ethen	⇧	⇧	⇩

Da der Wasserstoffgehalt im Teer/Öl keine Veränderungen erfährt, ist der Anstieg im Gas sehr wahrscheinlich auf Abspaltungen von Bruchstücken aus der Koksmatrix zurückzuführen. Dies würde auch den Effekt des sinkenden Anteils an Flüchtigen und den gleichzeitig steigenden Anteil an fixem Kohlenstoff im Koks erklären. Letztgenannter ist ebenfalls mit einer Abreicherung an Sauerstoff im Koks verbunden.

Tabelle 4-6: **Einfluss verschiedener Biomassemischungen auf die Zusammensetzung der Pyrolyseprodukte** *(Pyrolysebedingungen: Festbett, 500 °C, Schnellaufheizung);* **Abweichung zum additiven Verhalten (MR)**

Einsatzstoffe	Waldrestholz/ Weizenstroh	Waldrestholz/Grünschnittroggensilage	Sägerestholz/ Maissilage
Koks			
Flüchtige	⇩**?**	⇩	⇩**?**
Fixer Kohlenstoff	⇧**?**	⇧	⇨
Kohlenstoff	**ja**	⇧	⇧
Wasserstoff	**ja**	**ja**	**ja**
Sauerstoff	**ja**	⇩	⇩
Gas			
Kohlenstoff	⇧	⇧	**ja**
Wasserstoff	⇧	⇧	**ja**
Sauerstoff	⇩	⇩	**ja**
Teer/Öl			
Kohlenstoff	⇧**?**	⇧**?**	⇩**?**
Wasserstoff	⇨	⇨	⇧**?**
Sauerstoff	⇩**?**	⇩**?**	**ja**

Tabelle 4-7: **Einfluss verschiedener Biomassemischungen auf den Brennwert der Pyrolyseprodukte** *(Pyrolysebedingungen: Festbett, 500 °C, Schnellaufheizung);* **Abweichung zum additiven Verhalten (MR)**

Einsatzstoffe	Waldrestholz/ Weizenstroh	Waldrestholz/Grünschnittroggensilage	Sägerestholz/ Maissilage
Koks	⇩	⇨	⇨
Gas	⇧	⇧	⇧
Teer/Öl	⇧**?**	⇧**?**	⇩**?**

Abschließend ist festzustellen, dass bei der Pyrolyse von Mischungen aus verschiedenen Biomassen, die unterschiedliche Gehalte an Lignin, Hemicellulose und Cellulose aufweisen, Effekte festzustellen sind, die vom rein additiven Verhalten (Mischungsregel) abweichen. Dies bedeutet, dass entstehende Pyrolyseprodukte miteinander interagieren und somit eine Verschiebung in der Produktverteilung, der -zusammensetzung und dem Energieinhalt auftreten. Die Auswirkungen sind jedoch mit Erhöhung der Zumischrate an halmgutartiger Biomasse zum Holz mitunter nicht gleich. So können sich z. B. bei der Produktverteilung von der niedrigen zur hohen Zumischrate die Effekte umkehren. Eindeutige Trends ergeben sich jedoch für das Pyrolysegas. Hier konnte für die Mischungen aus Waldrestholz und Weizenstroh bzw. Grünschnittroggensilage unabhängig von der Zumischrate eine Erhöhung der Gasausbeute festgestellt werden, die auf einem Anstieg der C2-Kohlenwasserstoffe (Ethan, Ethen) beruht, der sich auch in einem entsprechend höheren Brennwert niederschlägt. Im Koks sinkt der Flüchtigenanteil zugunsten des Gehaltes an fixem Kohlenstoff.

Die detaillierten Ergebnisse zur Pyrolyse der Biomassemischungen sowie die über die Mischungsregel berechneten Werte sind Anhang I zu entnehmen.

4.1.8 Pyrolyseverhalten von Cellulose, Hemicellulose und Lignin

Die Betrachtung des Pyrolyseverhaltens der in der Biomasse enthaltenen Grundstrukturen ist wichtig, um bereits aus der Stoffgruppenzusammensetzung der Einsatzstoffe Erkenntnisse zum Verhalten während der thermischen Zersetzung abzuleiten. Dies könnte bis zu einer möglichen Vorhersage des Pyrolyseverhaltens auf Basis der Stoffgruppenzusammensetzung gehen. Dabei stellt sich die Frage, inwieweit dies überhaupt durchführbar ist, da zwischen verschiedenen Biomassen Unterschiede in der Struktur insbesondere bei den Hemicellulosen und bei Lignin auftreten. Bei Cellulose, als sehr einheitlich aufgebautes Molekül, ergeben sich lediglich Abweichungen beim Polymerisationsgrad (Kettenlänge). Zudem ist die Struktur der für die Untersuchungen notwendigen Biopolymere zu unterschiedlichen Graden (Abhängig vom Aufschlussverfahren) chemisch verändert (z. B. Alkali-Lignin → starke Veränderung; Organosolv-Lignin → schwache Veränderung) oder es kann wie bei den Hemicellulosen nur ein spezieller Vertreter der Stoffgruppe z. B. Xylan ausgewählt werden. Hemicellulosen stellen verglichen mit der Cellulose kurzkettigere Moleküle mit Verzweigungen dar. Ihre Grundbausteine sind Hexosen, Pentosen und Uronsäuren.

Abbildung 4-37 bis Abbildung 4-39 zeigen den Einfluss der Temperatur auf die Morphologie des bei der Pyrolyse der 3 Biopolymere entstehenden Feststoffes. Das hellbraune Ausgangsmaterial des Xylans ist bei 250 °C an der Oberfläche leicht pyrolysiert und weist eine dunkelbraune Farbe auf. Mit steigender Temperatur und Umsatzrate zeigt sich ein schwarzer Koks, welcher zunehmende Verbackungen aufweist.

Bei der Pyrolyse des Fichtesulfitzellstoffes (Ausgangsmaterial gepresste Platten) ergeben sich bis 350 °C mit Ausnahme der Farbänderung von hellbraun über dunkelbraun nach schwarz kaum sichtbare Veränderungen der Morphologie (s. Abbildung 4-38). Ab einer Pyrolysetemperatur von 500 °C zeigen sich infolge der Fortschreitenden Auflösung des Feststoffgerüstes faserige Strukturen.

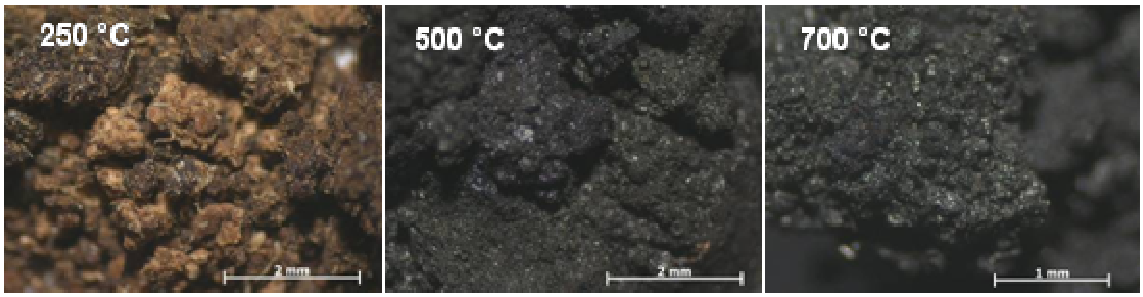


Abbildung 4-37: Einfluss der Temperatur auf die Morphologie des Kokses bei der Pyrolyse von Xylan (2664) (Körnung: < 2 mm, Festbett, Schnellaufheizung)

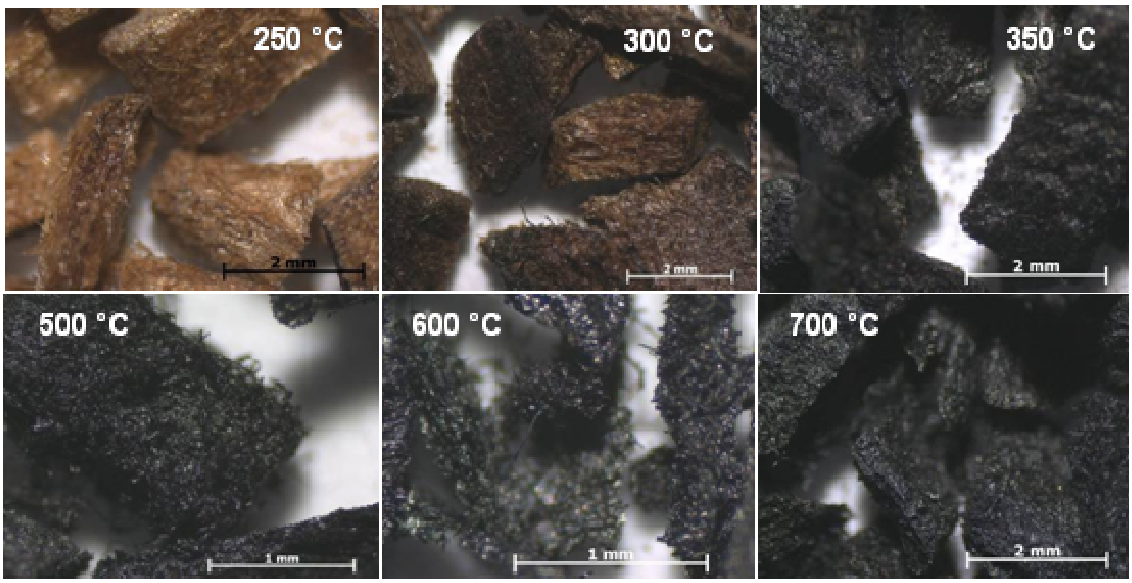


Abbildung 4-38: Einfluss der Temperatur auf die Morphologie des Kokses bei der Pyrolyse von Fichtesulfitzellstoff (2621) (Körnung: < 2 mm, Festbett, Schnellaufheizung)

Das Lignin erhält während der Pyrolyse seine äußerliche Morphologie (s. Abbildung 4-39). Das dunkelbraune Ausgangsmaterial zeigt ab 400 °C eine schwarze Färbung.

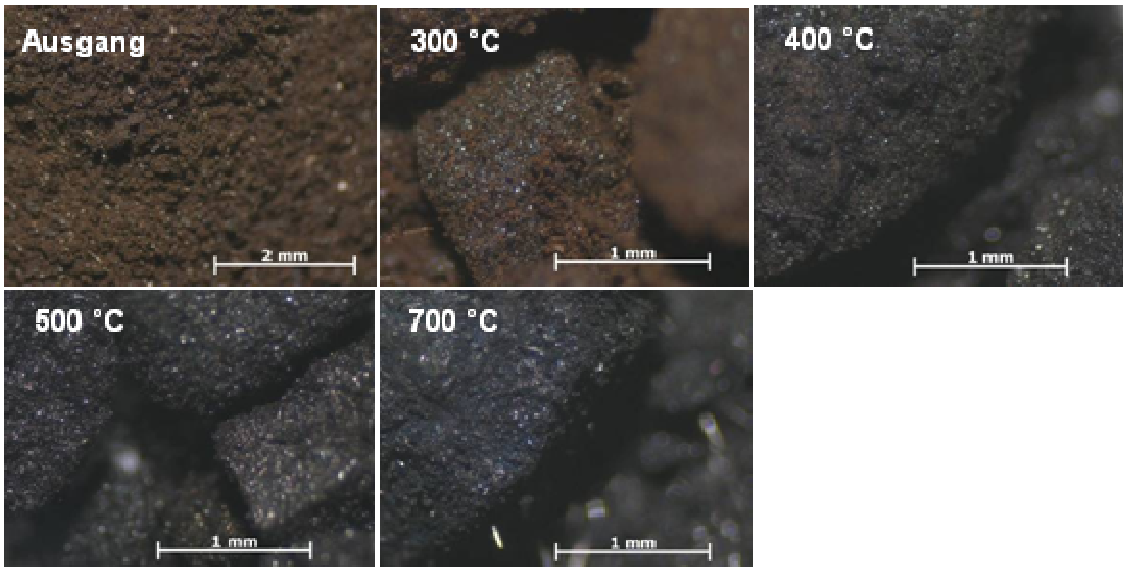


Abbildung 4-39: **Einfluss der Temperatur auf die Morphologie des Kokses bei der Pyrolyse von Alkali-Lignin (2665) (Körnung: < 2 mm, Festbett, Schnellaufheizung)**

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Untersuchungen zur Pyrolyse der drei Biopolymere in der Festbettpyrolyseapparatur vorgestellt und diskutiert.

Produktverteilung

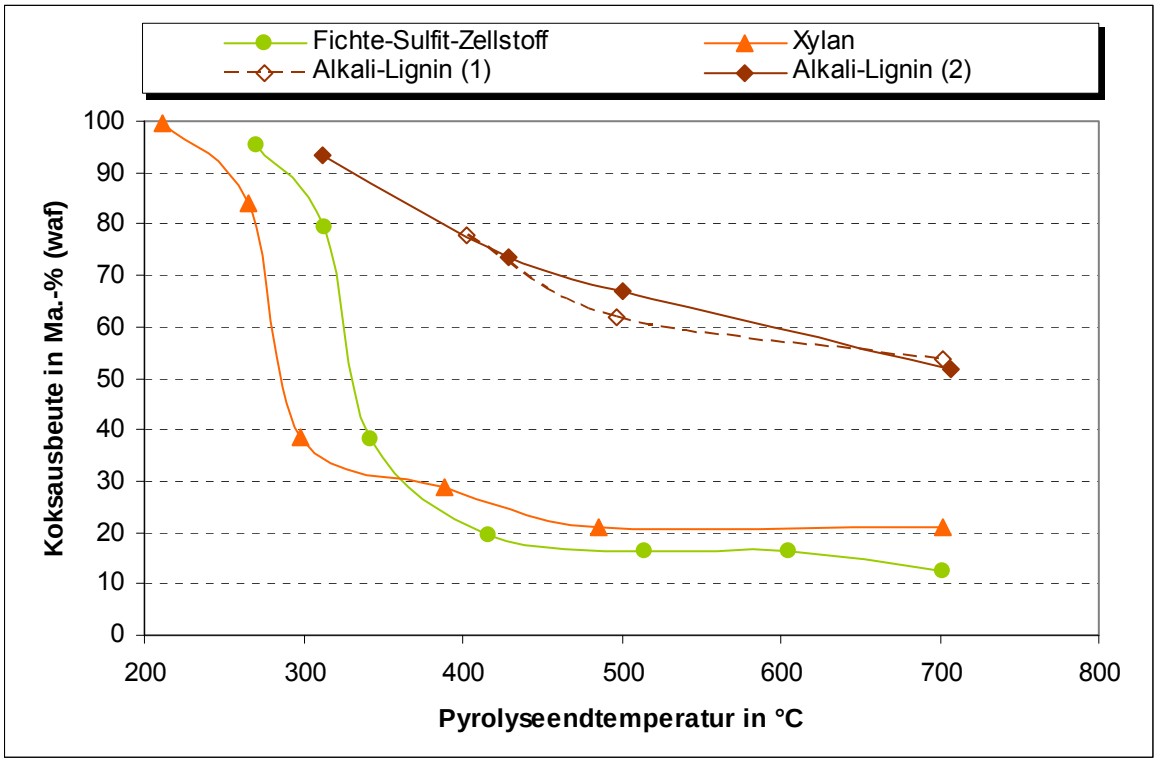


Abbildung 4-40: **Koksausbeute bei der Pyrolyse der Biopolymere in Abhängigkeit von der Pyrolysetemperatur (Festbett, Schnellaufheizung, Körnung: < 2 mm)**

Abbildung 4-40 zeigt zunächst die Koksausbeute bei der Pyrolyse von Fichtesulfit-Zellstoff (Cellulose), Xylan (Hemicellulose) und Alkali-Lignin in Abhängigkeit von der Pyrolysetemperatur. Die Unterschiede im Zersetzungsverhalten ergeben sich dabei aus den Strukturen der Biopolymere.

Xylan und der Fichtesulfit-Zellstoff zersetzen sich aufgrund ihrer definierten Struktur in einem sehr engen Temperaturbereich. Xylan setzt zwischen 210 und 300 °C bereits 62 Ma.-% (waf) an flüchtigen Bestandteilen frei. Bis 500 °C werden anschließend weitere 18 Ma.-% (waf) entbunden. Danach strebt die Koksausbeute einen Grenzwert an. Der Pyrolysebeginn des Zellstoffes liegt etwa 40 K höher. In der Hauptphase des Abbaus bis 400 °C sinkt die Koksausbeute auf ca. 20 Ma.-% (waf). Eine weitere Temperaturerhöhung resultiert in einer weiteren Abnahme des verbleibenden Feststoffes. Lignin unterliegt infolge seiner komplexen makromolekularen Struktur einer pyrolytischen Zersetzung über einen weiten Temperaturbereich mit dem Beginn bei 300 °C. Bis 700 °C sinkt die Koksausbeute auf ca. 52 Ma.-% (waf). Zum Vergleich: Zellstoff und Xylan weisen hier nur noch Koksausbeuten von 12,4 bzw. 21,1 Ma.-% (waf) auf.

Bei der Ausbeute an kondensierbaren Produkten liegt der Zellstoff vor dem Xylan und dem Lignin. Dabei liefert die pyrolytische Zersetzung des Fichtesulfit-Zellstoffs zwischen 400 und 700 °C sehr hohe Teer/Öl-Mengen (um 45 Ma.-%) (s. Abbildung 4-41). Die Cellulose wird zwischen 200 und 300 °C zunächst in sogenannte „aktivierte Cellulose“ oder Anhydrocellulose umgewandelt. Dies ist mit einer Reduktion des Polymerisationsgrades (Aufbrechen glycosidischer Bindungen) verbunden. Zwischen 300 und 400 °C wird die Hauptmenge der kondensierbaren Produkte durch Depolymerisations- und Dehydrierungsreaktionen gebildet /Balat2008/. Das Xylan liefert Teer/Öl-Ausbeuten bis maximal 30 Ma.-% (waf), wobei die Hauptmenge zwischen 260 und 300 °C entbunden wird. Bei Temperaturen über 400 °C nimmt die Teer/Öl-Ausbeute wieder ab. Die Ligninpyrolyse ergibt wesentlich geringere Mengen an kondensierbaren Produkten (bis 15 Ma.-% waf). Die Entbindung erfolgt zwischen 300 und 700 °C relativ kontinuierlich und ist auf die Abspaltung von Seitenketten vom aromatischen Ring und den Zerfall in Mono- und Dimere zurückzuführen. Bei höheren Temperaturen werden auch C-C-Bindungen sowie Bindungen zwischen Sauerstoff und aromatischen Ringen gespalten /Bayerbach2006/.

Die Zersetzungswasserausbeuten liegen für Zellstoff und Xylan bis 500 °C in einer ähnlichen Größenordnung, danach kommt es beim Zellstoff zu einem Absinken und beim Xylan zu einem weiteren Anstieg (s. Abbildung 4-41). Die stärkste Entbindung an Zersetzungswasser erfolgt in der Hauptzersetzungsphase (bis 20 Ma.-% waf), welche bei Xylan gegenüber dem Zellstoff um 40 K zu tieferen Temperaturen verschoben ist. Die maximale Ausbeute an Zersetzungswasser ergibt sich bei der Pyrolyse des Zellstoffs bei 500 °C (24,5 Ma.-% waf) und bei Xylan bei 700 °C (28,0 Ma.-% waf). Die Bildung des Zersetzungswassers bei Xylan und Cellulose resultiert aus Dehydratisierungsreaktionen der Zuckermoleküle, wobei jeweils eine OH-Gruppe und ein benachbartes Wasserstoffatom beteiligt sind. Für die Ligninpyrolyse ergeben sich im untersuchten Temperaturbereich Zersetzungswasserausbeuten zwischen 7 und 17 Ma.-% (waf). Diese resultieren aus der Zersetzung sauerstoffhaltiger Gruppen in der Ligninstruktur, welche jedoch im Vergleich zu Hemicellulose und Cellulose wesentlich geringere Anteile an Sauerstoff aufweist.

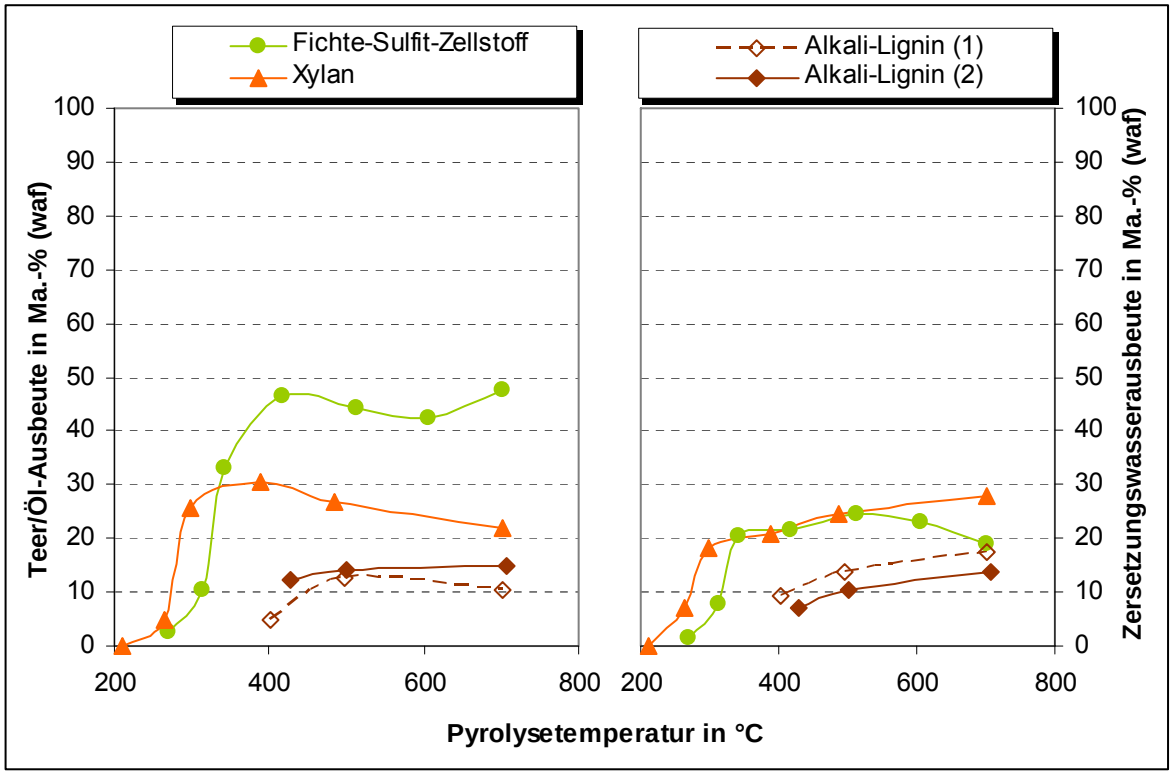


Abbildung 4-41: **Teer/Öl- und Zersetzungswasserausbeute bei der Pyrolyse der Biopolymere in Abhängigkeit von der Pyrolysetemperatur (Festbett, Schnellaufheizung, Körnung: < 2 mm)**

Die höchsten Ausbeuten an Pyrolysegas liefert das Xylan (s. Abbildung 4-42). Bis 300 °C kommt es zu einem Anstieg auf 17,7 Ma.-% (waf), der auf die Entbindung von CO und CO_2 zurückzuführen ist. Nach einer Plateauphase bis 400 °C erfolgt bis 500 °C ein weiterer Anstieg auf ca. 29 Ma.-% (waf), der aus dem Beginn der Methanbildung resultiert. Bei Temperaturen über 500 °C ist keine weitere Erhöhung der Gasausbeute bei Xylan zu verzeichnen. Bei Lignin startet die Entbindung von Permanentgasen ab ca. 310 °C. Der Verlauf ist relativ kontinuierlich und ergibt bei 700 °C eine Ausbeute von ca. 19 Ma.-% (waf). Bei dieser Temperatur dominieren Wasserstoff (31,4 bzw. 36,8 Vol.-%) und Kohlendioxid (41,4 bzw. 35,7 Vol.-%) die Zusammensetzung des Pyrolysegases. Die Pyrolyse von Fichtesulfit-Zellstoff ergibt Gasmengen, die leicht über denen des Alkali-Lignins liegen (s. Abbildung 4-42). Zwischen 310 und 340 °C kommt es zu einem starken Anstieg der Gasausbeute (+5,8 Ma.-% waf), welcher sich dann allmählich fortsetzt (+12,5 Ma.-% waf bis 700 °C). Die starke Zunahme im unteren Temperaturbereich resultiert dabei aus einer erhöhten Entbindung von Kohlenmonoxid.

Die unterschiedlichen Zersetzungsbereiche und entstehenden Produkte hängen maßgeblich von der Struktur der Biopolymere ab. So führt die Pyrolyse des aus Glucose-Ketten aufgebauten Zellstoffes überwiegend zur Bildung von Flüssigprodukten (max. 68,6 Ma.-% waf), während bei Xylan (Hemicellulose), welches aus verschiedenen Zuckermonomeren und Uronsäuren eine verzweigte Struktur bildet, dominierend flüssige (max. 51,4 Ma.-% waf) und gasförmige (max. 29 Ma.-% waf) Produkte entstehen. Die Zersetzung des aus aromatischen Ringverbindungen komplex zusammengesetzten Lignins hingegen ergibt hohe Ausbeuten an Feststoff (Koks).

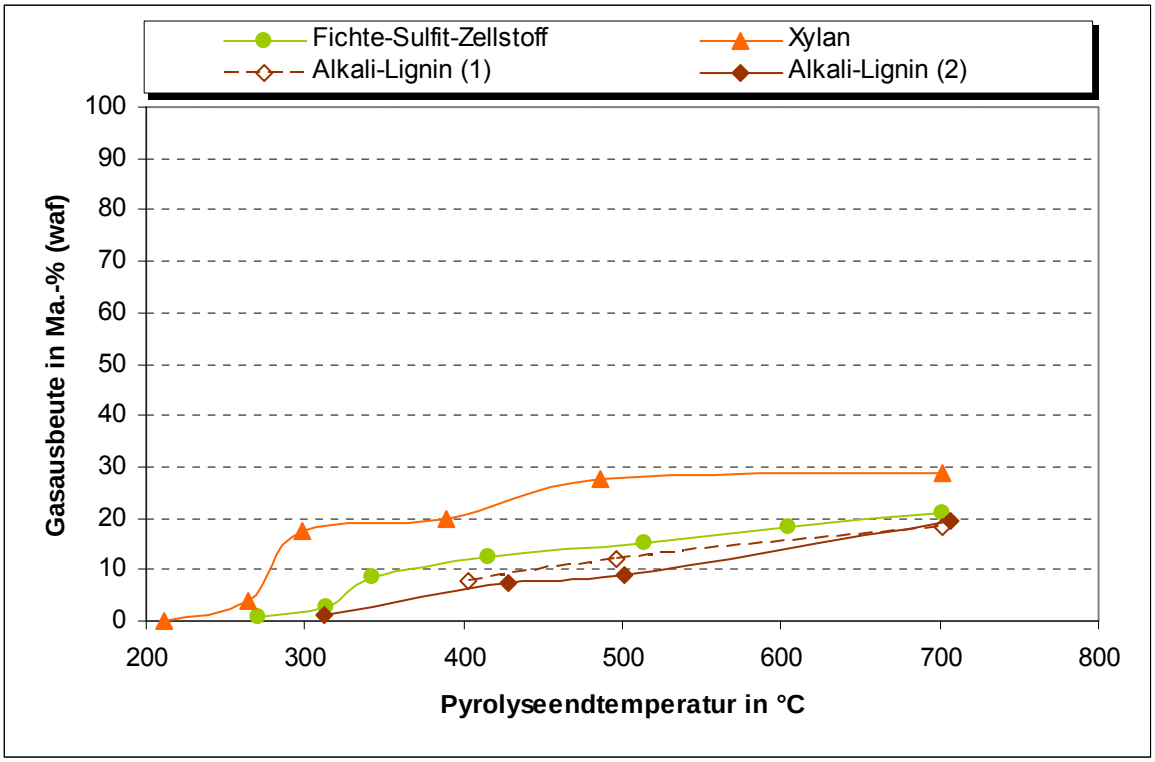


Abbildung 4-42: **Gasausbeute bei der Pyrolyse der Biopolymere in Abhängigkeit von der Pyrolysetemperatur (Festbett, Schnellaufheizung, Körnung: < 2 mm)**

Gaszusammensetzung

Die bei der Pyrolyse entstehenden gasförmigen Produkte bestehen im Wesentlichen aus Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Methan und Wasserstoff. Weiterhin werden niedermolekulare Kohlenwasserstoffe (C2 bis C4) und insbesondere bei Alkali-Lignin Schwefelverbindungen (H_2S, COS) freigesetzt. Zum Beginn der Zersetzung werden überwiegend CO_2 und CO als Primärprodukte der Pyrolyse entbunden (s. Abbildung 4-43). Diese entstehen durch Decarboxylierungs- und Decarbonylierungsreaktionen der organischen Matrix. Unterschiede zwischen den einzelnen Stoffgruppen ergeben sich in der Höhe der Anteile. Die Pyrolyse von Xylan und dem Fichtesulfit-Zellstoff liefert höhere CO-Gehalte im Gas (ab 300 °C um 40 Vol.-%), während bei Lignin lediglich ca. 10 Vol.-% enthalten sind. CO kann dabei bei Hemicellulosen und Cellulose aus den Carbonylgruppen (CO-) der Zuckermoleküle abgespalten werden. Lignin enthält aufgrund seiner aromatischen Grundstruktur wesentlich geringere Anteile derartiger Gruppen. Diese befinden sich in den Seitenketten der aromatischen Ringe. Die Abspaltung von am aromatischen Ring gebundenen CO-Gruppen wird infolge der hohen Bindungsenergien nicht bevorzugt. Die Gasausbeute an CO zeigt bei Xylan ab 350 °C eine Stagnation, was bedeutet, dass die Freisetzung dieser Komponente abgeschlossen ist. Ähnliches ergibt sich auch für CO_2 jedoch erst ab ca. 450 °C.

Bei Lignin dominiert bis 500 °C CO_2 im Gas (70…90 Vol.-%) (s. Abbildung 4-43). Für Xylan und Zellstoff liegen die Anteile zwischen 300 und 500 °C deutlich niedriger (50…60 Vol.-%).

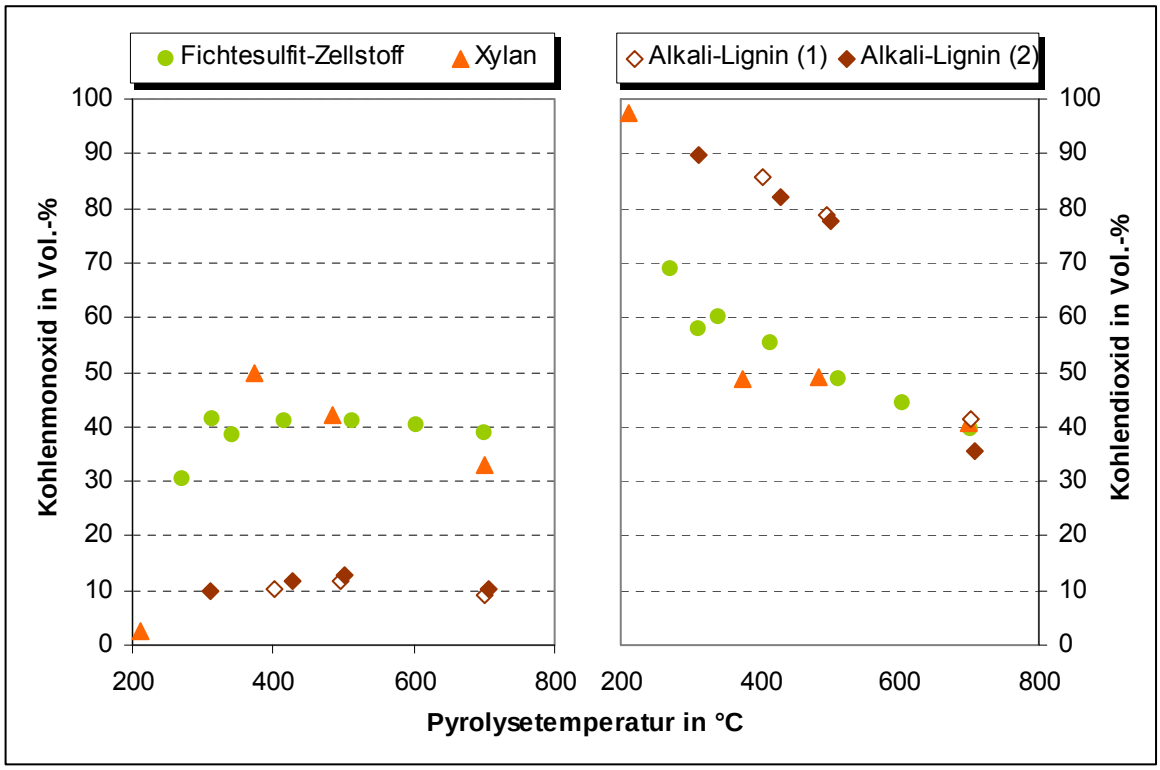


Abbildung 4-43: **Entbundene Volumenanteile an Kohlenmonoxid und Kohlendioxid im Gas bei der Pyrolyse der Biopolymere in Abhängigkeit von der Pyrolysetemperatur (Festbett, Schnellaufheizung, Körnung: < 2 mm)**

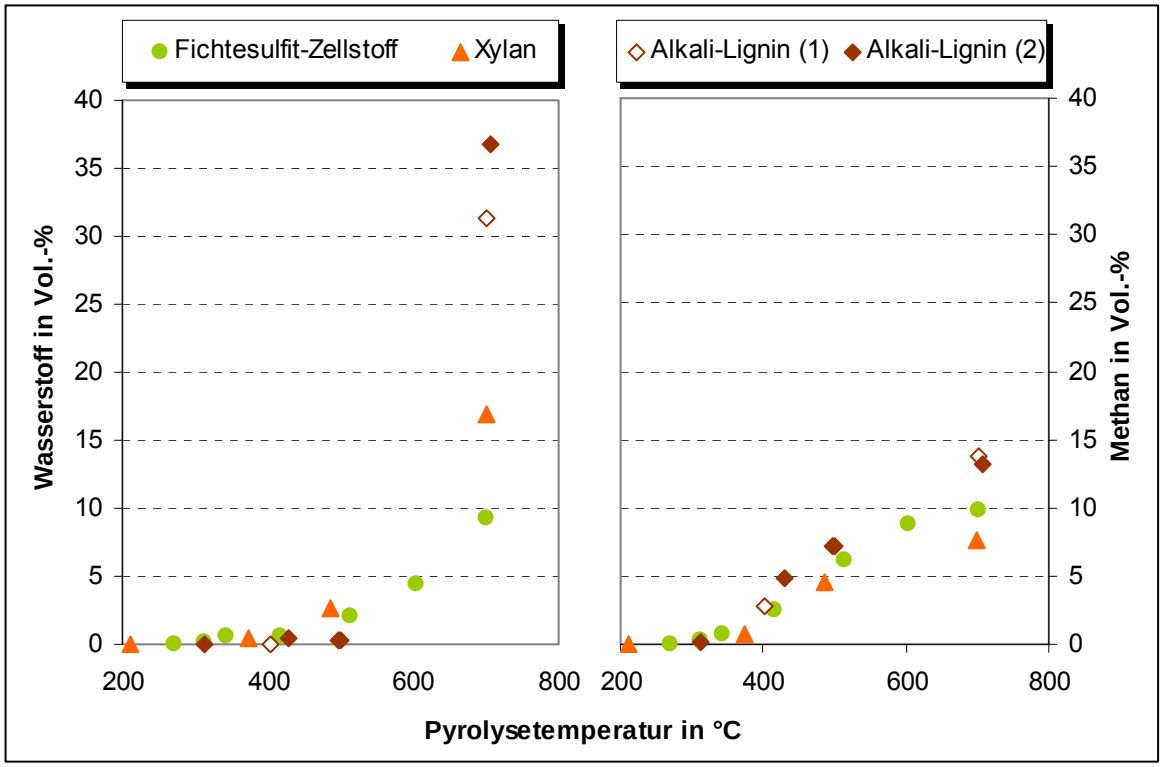


Abbildung 4-44: **Entbundene Volumenanteile an Wasserstoff und Methan im Gas bei der Pyrolyse der Biopolymere in Abhängigkeit von der Pyrolyse-temperatur (Festbett, Schnellaufheizung, Körnung: < 2 mm)**

Ab einer Pyrolysetemperatur von 400 °C erfolgt eine zunehmende Freisetzung an Methan, welches aus der Abspaltung von Methylgruppen aus der organischen Matrix stammt (s. Abbildung 4-44). Die Entbindung flacht jedoch ab 500 °C wieder ab. Bei Lignin kann es dabei auch dazu kommen, dass Bindungen im aromatischen Ring aufgebrochen werden. Für die Pyrolyse von Xylan und Zellstoff steigt ab 400 °C ebenfalls die Wasserstoffentbindung, welche bei Lignin erst ab 500 °C einsetzt, dort aber sofort sehr stark zunimmt (ca. 35 Vol.-% bis 700 °C). Ursache für die starke Wasserstoffentbindung bei Lignin (+50…70 l i.N./kg Biomasse zwischen 500 und 700 °C) sind in diesem Temperaturbereich ablaufende Polykondensationsreaktionen von aromatischen Radikalen. Bei der Pyrolyse von Xylan und Zellstoff führen die ab 450 °C einsetzenden Dehydrierungsreaktionen zur Wasserstofffreisetzung.

Kokszusammensetzung

Der Fichtesulfit-Zellstoff weist mit 92,3 Ma.-% (waf) den höchsten Gehalt an flüchtigen Bestandteilen auf. Der bei der Pyrolyse entstehende Koks zeigt insbesondere in der Hauptphase der Zersetzung zwischen 310 und 410 °C eine deutliche Abnahme des Anteils flüchtiger Bestandteile (-53 Ma.-% waf) (s. Abbildung 4-45). Bis zu einer Temperatur von 700 °C erfolgt ein weiteres Absinken (-23,9 Ma.-%).

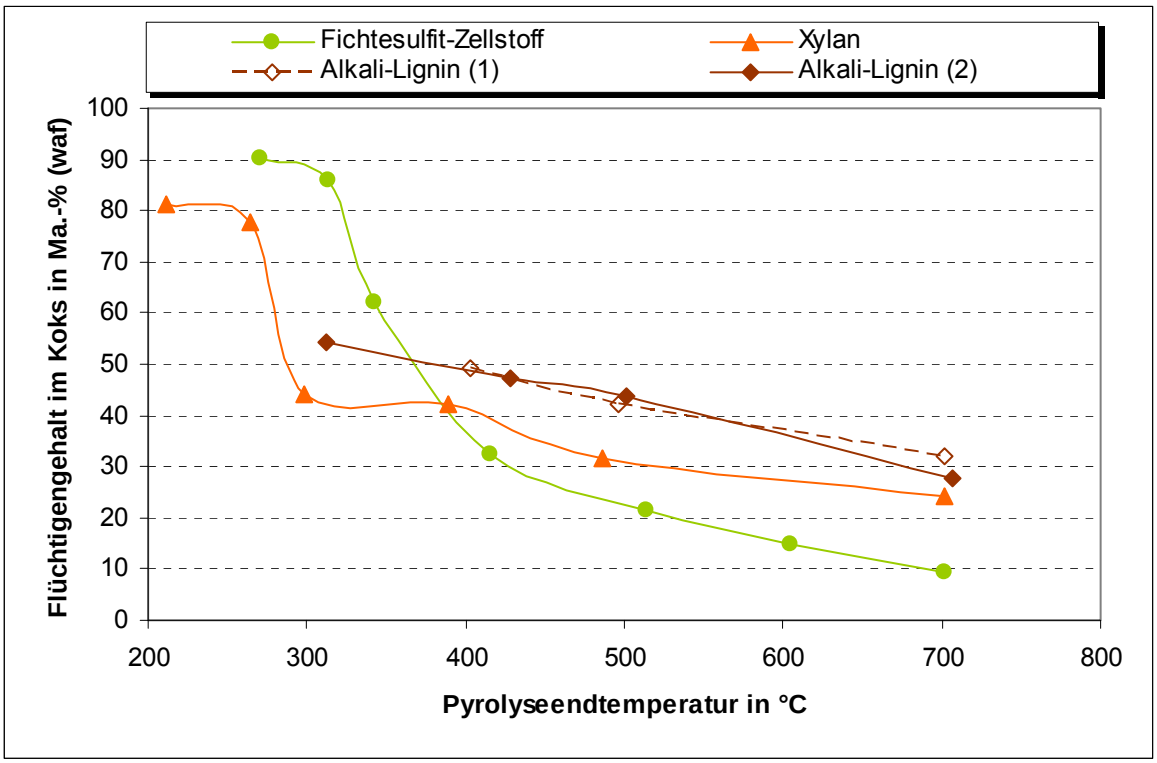


Abbildung 4-45: Flüchtigengehalt im Koks bei der Pyrolyse der Biopolymere in Abhängigkeit von der Pyrolysetemperatur (Festbett, Schnellaufheizung, Körnung: < 2 mm)

Das Xylan weist mit 81,3 Ma.-% (waf) weniger flüchtige Komponenten verglichen mit dem Zellstoff auf. Am Verlauf des Flüchtigenanteils im Koks lässt sich erneut die zweistufige Zersetzung des Xylans erkennen (s. Abbildung 4-45). In der erste Phase zwischen 260 und 300 °C zeigt der Feststoff eine deutliche Verarmung an Flüchtigen (-45,8 Ma.-% waf). Bis 400 °C erfolgt keine Veränderung der Kokszusammensetzung. Eine weitere Temperaturerhöhung bewirkt erneut eine Reduzierung des Gehalts an flüchtigen Bestandteilen im Koks (-17,4 Ma.-% waf). Die allmähliche Zersetzung des

Lignins über einen breiten Temperaturbereich zeigt sich ebenfalls am Flüchtigenanteil im Koks, der bis 700 °C auf ca. 30 Ma.-% (waf) abfällt (s. Abbildung 4-45).

Im untersuchten Temperaturbereich bis 700 °C werden bei der Pyrolyse von Zellstoff ca. 90 %, von Xylan ca. 70 % und von Alkali-Lignin ca. 45 % der im Rohstoff enthaltenen flüchtigen Bestanteile entbunden. Bei Betrachtung der Elementarzusammensetzung des Kokses fällt auf, dass der aus der Pyrolyse von Xylan resultierende Koks bis zu einer Temperatur von 700 °C den höchsten Kohlenstoff- und somit niedrigsten Sauerstoffgehalt aufweist. Bei 500 °C liegt der Kohlenstoffanteil bereits bei 92 Ma.-% (waf) und steigt bis 700 °C nur noch wenig. Die weitestgehend vollständige Entbindung des Sauerstoffs bedeutet, dass dieser im Xylan in Verbindungen enthalten ist, welche sich leicht abspalten lassen, also verhältnismäßig geringe Bindungsenergien besitzen. Der Zellstoff, welcher einen Sauerstoffgehalt in der Größenordnung des Xylan (ca. 47 Ma.-% waf) aufweist, besitzt jedoch auch bei Pyrolysetemperaturen zwischen 500 und 700 °C noch Restsauerstoffanteile im Koks von 10 bis 15 Ma.-% (waf) und somit auch geringere Kohlenstoffanteile (82 bis 88 Ma.-%), obwohl der Flüchtigengehalt bereits wesentlich niedriger liegt. Zudem zeigt der Zellstoff bereits ab 400 °C nur noch geringfügige Veränderungen für Sauerstoff und Kohlenstoff im Koks. Das Lignin erfährt eine sukzessive Steigerung des Kohlenstoffgehaltes (+27,4 Ma.-% waf) bei gleichzeitigem Absinken des Sauerstoffanteils (-21,9 Ma.-% waf). Bei 700 °C ergibt sich folgende Zusammensetzung: C 93,9; H 2,1; O 0,3 Ma.-% (waf); Rest: $N+S_C$. Auch Lignin zeigt im untersuchten Temperaturbereich eine annähernd vollständige Entbindung des im Ausgangsstoff enthaltenen Sauerstoffes, dennoch besitzt der Koks noch vergleichsweise hohe Restflüchtigengehalte. Dies bedeutet, dass die flüchtigen Bestandteile bei Xylan und Lignin zu größeren Anteilen aus kohlenstoffreicheren Verbindungen bestehen, welche höhere Bindungsenergien sowie geringere Flüchtigkeiten aufweisen.

Der Wasserstoffgehalt im Koks nimmt für alle untersuchten Biopolymere mit steigender Pyrolysetemperatur von ca. 6 Ma.-% (waf) auf 2 bis 3 Ma.-% (waf) ab. Stickstoff reichert sich in der Koksmatrix an.

Teer/Öl-Zusammensetzung

Die größten Veränderungen der Teer/Öl-Zusammensetzung in Abhängigkeit von der Temperatur ergeben sich bei der Pyrolyse von Xylan. Der Kohlenstoffgehalt steigt von 41,5 Ma.-% (waf) bei 260 °C auf 78,8 Ma.-% (waf) bei 700 °C, entsprechend verringert sich der Sauerstoffanteil von 57,7 auf 14,2 Ma.-% (waf). Der Wasserstoffgehalt im Teer/Öl erhöht sich bis ca. 400 °C und bleibt bei weiterer Temperaturerhöhung konstant auf einem Wert um 7 Ma.-% (waf). Die Pyrolyse des Zellstoffs ergibt ab 400 °C eine konstante Zusammensetzung der Teer/Öl-Fraktion (C: ≈58; H: ≈6; O: ≈35 Ma.-% waf). Änderungen zeigen sich somit nur in der Hauptphase der Zersetzung in der ein leichtes Absinken des Kohlenstoffanteils und eine Zunahme an Sauerstoff sowie Wasserstoff im Teer/Öl zu verzeichnen ist. Für die Teer/Öl-Zusammensetzung der beiden untersuchten Alkali-Lignine ergeben sich ähnliche Größenordnungen und Effekte in Abhängigkeit von der Pyrolysetemperatur. Infolge der im Einsatzstoff enthaltenen hohen Schwefelanteile, weist auch die organische Fraktion des Flüssigproduktes sehr hohe Werte auf (17…23 Ma.-% waf). Eine Steigerung der Pyrolysetemperatur zwischen 400 und 700 °C bewirkt eine leichte Erhöhung des Kohlenstoff- (+4…+6 Ma.-% waf) bei gleichzeitigem Absinken des Sauerstoffgehaltes (5 → 0,2 Ma.-% waf). Die

Größenordnungen für die Teer/Öl-Zusammensetzung des Lignins ergeben sich wie folgt: C ≈70; H ≈10; O: 5…0,2 Ma.-% waf).

Energieinhalt

Die Brennwerte der Pyrolyseprodukte unterscheiden sich in Abhängigkeit der ablaufenden Zersetzungsmechanismen deutlich. Das bei der Zersetzung des Fichtesulfitzellstoffs entstehende Teer/Öl besitzt innerhalb der Stoffgruppen mit 23.800 bis 27.800 kJ/kg (waf) die niedrigsten Brennwerte. Bei Xylan liegen die Werte mit 26.400 bis 32.000 kJ/kg (waf) bereits höher und Lignin zeigt infolge der sehr niedrigen Sauerstoffgehalte im Teer/Öl die höchsten Brennwerte (28.000 bis 32.200 kJ/kg waf), wobei mit steigender Pyrolysetemperatur ein absteigender Trend erkennbar ist. Der Energieinhalt des Kokses steigt infolge der Fortschreitenden Abspaltung von flüchtigen und insbesondere sauerstoffhaltigen Komponenten. Für 700 °C ergeben sich Brennwerte im Bereich um 34.000 kJ/kg (waf). Das Pyrolysegas weist verglichen mit den anderen Produkten die geringsten Energieinhalte auf. Der Gasbrennwerte bei der Ligninpyrolyse liegt bis 500 °C im Bereich bis 2.800 kJ/kg (waf), da im Wesentlichen CO_2 entbunden wird, das infolge der vollständigen Oxidation einen Brennwert von 0 kJ/kg besitzt. Danach ergibt sich ein rapider Anstieg des Gasbrennwertes auf > 11.000 kJ/kg (waf), welcher auf die deutlich erhöhte Entbindung von Wasserstoff und Methan zurückzuführen ist. Bei der Zellstoffpyrolyse steigt der Energieinhalt des Pyrolysegases sukzessive bis auf ca. 8.500 kJ/kg (waf) bei 700 °C infolge eines gleichbleibend hohen Anteils an CO und dem Anstieg an Wasserstoff und Methan ab 400 °C. Auch bei der Zersetzung von Xylan nimmt der Gasbrennwert zu, jedoch aufgrund der verglichen mit Zellstoff und Lignin geringeren Entbindung von Wasserstoff und Methan lediglich bis auf Werte um 7.000 kJ/kg (waf).

Die Differenz der chemisch gebundenen Energien zwischen Produkten und Biomasse bei der Pyrolyse der Biopolymere in Abhängigkeit von der Temperatur zeigt Abbildung 4-46. Der Zellstoff weist dabei bis auf einen Versuchspunkt ausnahmslos endotherme Wärmetönungen bis +1.000 kJ/kg (waf) auf, d. h. die in den Produkten chemisch gebundene Energie übersteigt die des Einsatzstoffes. Bei der Xylanpyrolyse dominieren im unteren Temperaturbereich bis 400 °C endotherme Reaktionen und darüber die exothermen Reaktionen (bis ca. -1.600 kJ/kg waf). Bei der pyrolytischen Zersetzung des Alkali-Lignins ergeben sich für die untersuchten Temperaturen exotherme Wärmetönungen, die jedoch für beide Proben in einer unterschiedlichen Höhe liegen (Alkali-Lignin 1: -2.150 bis -4.040; Alkali-Lignin 2: -1.095 bis -2.385 kJ/kg waf). Die erhaltenen Trends können mit Literaturangaben bestätigt werden /Mok1983/, /Yang2007/. Auch die Ergebnisse der Untersuchungen mittels TG-DSC (s. Kapitel 4.3.2, S. 126) liefern ähnliche Erkenntnisse.

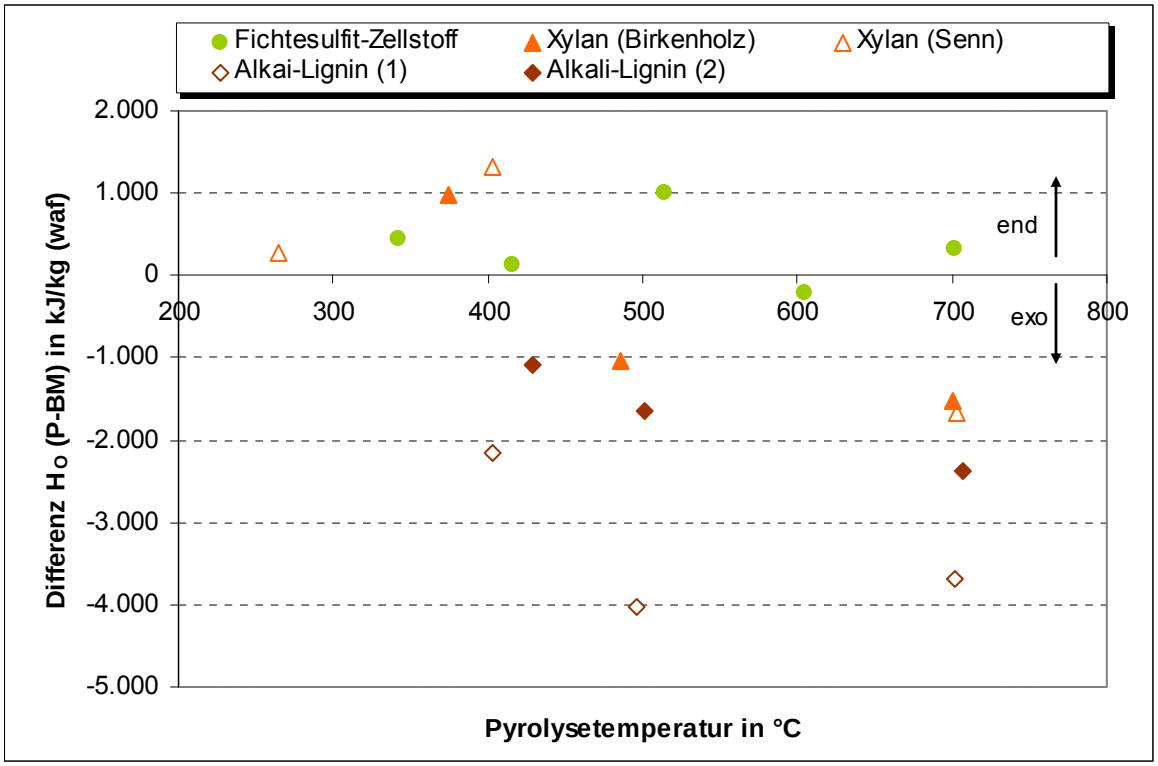


Abbildung 4-46: **„Reaktionsenthalpie“ bei der Pyrolyse der Biopolymere in Abhängigkeit von der Pyrolysetemperatur (Festbett, Schnellaufheizung, Körnung: < 2 mm)**

Die detaillierten Ergebnisse der Untersuchungen zur Pyrolyse der Biopolymere Cellulose, Hemicellulose und Lignin sind Anhang J zu entnehmen.

Die wesentlichen Erkenntnisse zur Pyrolyse der Stoffgruppen in Abhängigkeit der Prozesstemperatur werden nachfolgend kurz zusammengefasst. Der Einfluss der Temperatur gestaltet sich dabei weitestgehend analog zu den bei der Biomassepyrolyse festgestellten Effekten. Daher werden hier die wesentlichen Unterschiede im Zersetzungsverhalten der Biopolymere angegeben.

- Produktverteilung:
  - Hauptzersetzungsphase bei Cellulose zwischen 300 und 400 °C; 2-stufige Zersetzung bei Xylan: 200…300 °C (Hauptabbau), 300 bis 500 °C; allmähliche thermische Zersetzung des Lignins über einen breiten Temperaturbereich;
  - Cellulose liefert die höchsten Kondensatausbeuten, gefolgt von Xylan und Lignin;
  - hohe Anteile an Zersetzungswasser bei Xylan und Zellstoff, welche aus den OH-Gruppen der Zuckermoleküle gebildet werden (20…30 Ma.-% waf);
  - in etwa gleiche Anteile an Teer/Öl und Zersetzungswasser im Flüssigprodukt bei der Ligninpyrolyse;
  - Xylan liefert im gesamten Temperaturbereich die höchste Gasausbeute, danach folgen der Zellstoff und das Lignin;

- Produktzusammensetzung:

  Koks

  - bei > 400 °C besitzt der Koks des Zellstoffs den geringsten Flüchtigengehalt/höchsten Gehalt an fixem Kohlenstoff, gefolgt von Xylan und Lignin;
  - annähernd linearer Anstieg bzw. Abfall von Kohlenstoff bzw. Sauerstoff im Koks des Lignins, bei 700 °C liegen Xylan und Lignin in ähnlichen Größenordnungen (C ≈92 Ma.-% waf);

  Teer/Öl

  - geringster Kohlenstoff- (ca. 60 Ma.-% waf), Wasserstoff- (ca. 7 Ma.-% waf) und höchster Sauerstoffgehalt (30…40 Ma.-% waf) bei Zellstoff;
  - Lignin mit hohen Kohlenstoff- (ca. 70 Ma.-% waf) und Wasserstoff- (~10 Ma.-% waf) sowie sehr geringen Sauerstoffanteilen (< 7 Ma.-% waf), d.h. im Lignin gebundener Sauerstoff wird überwiegend in die Gasphase freigesetzt;
  - Xylan: Anstieg des Kohlenstoff- und Abfall des Sauerstoffgehaltes (700 °C: C ≈80, O ≈12 Ma.-% waf);

  Gas

  - höchste Wasserstoffentbindung bei der Pyrolyse von Lignin, geringste bei Zellstoff; Beginn der Wasserstofffreisetzung bei Xylan ab 400 °C, bei Lignin und Zellstoff ab 500 °C;
  - Ausbeuten an CO und CO_2 als Produkte der Primärpyrolyse bei Xylan am höchsten; CO_2 aus Decarboxylierungsreaktionen insbesondere von Säuregruppen der Uronsäuren; Stagnation der Ausbeuten ab 500 °C;
  - Zellstoffpyrolyse liefert hohe CO-Ausbeuten, Lignin die niedrigsten; bei CO_2 liegen die Ausbeuten in ähnlichen Größenordnungen;
  - Entbindung von C2-Kohlenwasserstoff: Xylan > Zellstoff > Lignin;

- Brennwert der Pyrolyseprodukte
  - Teer/Öl: Brennwerte bei Zellstoff infolge des hohen Sauerstoffgehaltes am geringsten (ca. 25 MJ/kg waf), danch folgt Xylan (ca. 27…29 MJ/kg waf) und Lignin (28…32 MJ/kg waf);
  - Gas: ähnliche Brennwerte bei Xylan und Zellstoff die infolge des hohen CO- und CO_2-Anteils gering ausfallen (2…8 MJ/kg), Lignin insbesondere ab 600 °C mit hohen Brennwerten durch starken Anstieg der Wasserstofffreisetzung (700 °C: 12,4 MJ/kg waf);
  - Koks: ab 400 °C ähnliche Größenordnungen für alle Biopolymere;
  - exotherme Wärmetönungen bei der Xylanpyrolyse erst ab 500 °C, Zellstoff: endotherm; Lignin: deutlich exotherm;

4.1.9 Besonderheiten bei der Pyrolyse von Maissilage

Bei der Pyrolyse von Maissilage im Festbettreaktor konnten bei Schnellaufheizung Besonderheiten bezüglich des Zersetzungsverlaufes festgestellt werden. So ergaben sich in der Hauptphase des pyrolytischen Abbaus zwei verschiedene Ausbeutekurven, deren Untersuchungspunkte mit entsprechenden Wiederholungsversuchen so auch belegt werden konnten (s. Abbildung 4-47). Der Hauptabbau liegt bei der Maissilage im Temperaturbereich zwischen 280 und 400 °C. Jedoch ergibt sich zum Einen ein Verlauf, welcher durch ein allmähliches Absinken der Koksausbeute bis ca. 370 °C (-26,3 Ma.-% wf) und einem steilen Abfall zwischen 370 und 400 °C (-31,9 Ma.-% wf) gekennzeichnet ist. Die zweite Kurve folgt dem bei Biomasse typischen Zersetzungsverhalten (s. Kapitel 4.3.3, S. 130) mit einer zunächst starken Reduzierung der Koksausbeute (-43,5 Ma.-% wf, 280…320 °C) und einem anschließend abflachenden Kurvenverlauf (-14,8 Ma.-% wf, 320…400 °C). Der Zersetzungsbeginn bei relativ geringen Temperaturen ist auf den hohen Anteil an Hemicellulosen (44,9 Ma.-% wf) zurückzuführen.

Die verschiedenen Ausbeuteverläufe in der Hauptzersetzungsphase spiegeln sich dementsprechend auch in den Produktzusammensetzungen wieder (s. Anhang D Tab Anhang D-55 bis Tab Anhang D-60).

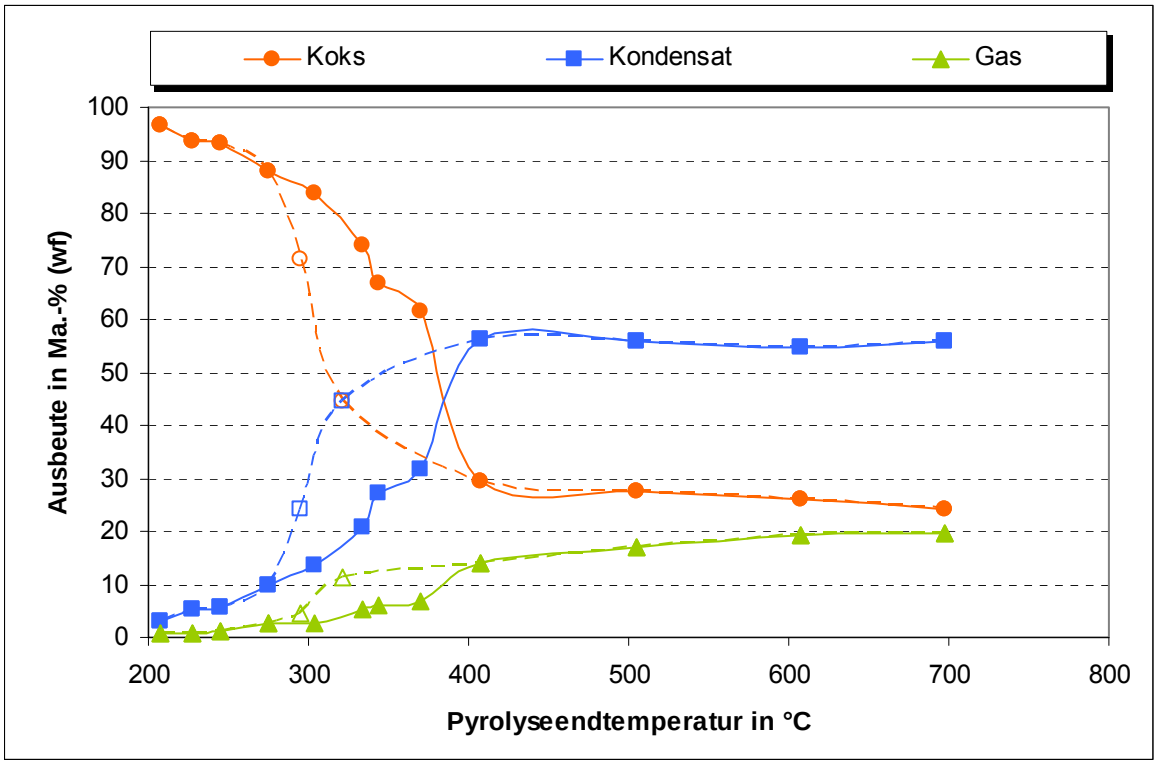


Abbildung 4-47: **Produktverteilung bei der Pyrolyse von Maissilage (2475) in Abhängigkeit von der Temperatur im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)**

Als Ursache für die unterschiedlichen Ausbeuteverläufe ergeben sich zwei mögliche Erklärungen. Einerseits wäre die Verwendung von uneinheitlichen Proben verschiedenen Gehalten an Maiskolben und Stengeln denkbar, da prinzipiell in der Frucht höhere Hemicelluloseanteile vorhanden sind. Infolge der Probenvorbereitung mit Probenteilung und Zerkleinerung scheint dies jedoch eher unwahrscheinlich. Andererseits wur-

den bei der Pyrolyse der Maissilage festgestellt, dass der erhaltene Koks „verbacken“ anfällt, was auf das Durchlaufen einer plastischen Phase hindeutet. Entsprechende Morphologien sind für die Kokse aus den Untersuchungen mit variablen Aufheizraten in Abbildung 4-48 dargestellt. Bei den Versuchen zur Temperaturvariation konnte dieser Effekt ebenfalls beobachtet werden. Die Ausbildung dieser „Verbackungen“ ist vermutlich auf das Verhalten der Hemicellulosen während der thermischen Zersetzung zurückzuführen. Die Ausbildung der plastischen Phase könnte zu einer Behinderung der Flüchtigenentbindung führen. Die Komponenten werden zwar entbunden, können aber aufgrund des plastischen Zustandes die Probenschüttung nicht verlassen. Nach Erreichen der Endtemperatur und der raschen Abkühlung kommt es zur Kondensation dieser Bestandteile, weswegen diese dann zur Koksausbeute (verbleibendes Material im Reaktor gerechnet werden. Warum dieser Effekt jedoch bei einigen Versuchen nicht auftrat, konnte nicht aufgeklärt werden.

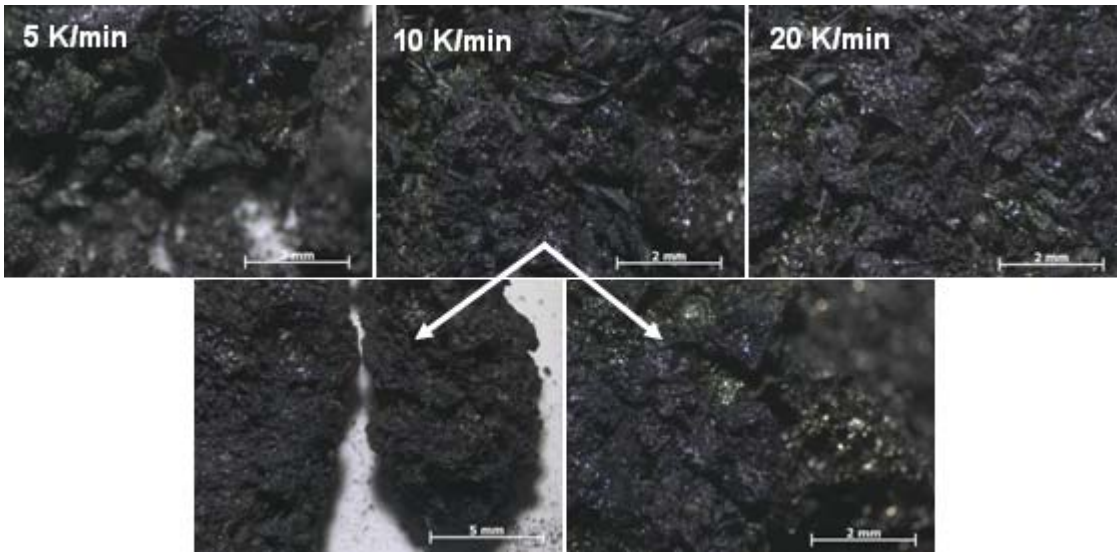


Abbildung 4-48: Morphologie des Kokse aus der Pyrolyse von Maissilage (2475) im Festbettreaktor bei verschiedenen Aufheizgeschwindigkeiten

4.2 Korrelation von Produktverteilung / -eigenschaften mit Rohstoffparametern

In einem weiteren Schritt wurde versucht, aus den vielen einzelnen Ergebnissen Korrelationen mit verschiedenen Rohstoffparametern (z. B. Flüchtigen-, Aschegehalt, Stoffgruppenzusammensetzung) abzuleiten.

4.2.1 Einfluss des Gehaltes an flüchtigen Bestandteilen

Der Einfluss des Anteils an flüchtigen Bestandteilen des Rohstoffes auf die Produktverteilung bei der Pyrolyse ist in Abbildung 4-49 dargestellt. Die holzartigen Biomassen weisen prinzipiell den höchsten Flüchtigengehalt auf, was in ihren hohen Anteilen an Cellulose in der Struktur resultiert, welche bei der thermischen Zersetzung kaum Feststoff zurücklässt. Stroh und Heu aus der Gruppe der Halmgüter zeigen die niedrigsten Anteile an flüchtigen Bestandteilen.

Die Koksausbeute wird in Abhängigkeit des Flüchtigengehaltes kaum beeinflusst. Bei der Ausbeute an flüssigen Produkten ergibt sich zwischen Weizenstroh (FB: 73,2 Ma.-% wf) und dem Sägerestholz der Fichte (FB: 85,7 Ma.-% wf) ein Anstieg um ca. 10 Ma.-% (waf), während die Gasausbeute um 8,3 Ma.-% (waf) zurückgeht. Dies bedeutet, dass der höhere Anteil flüchtiger Komponenten vermehrt in kondensierbarer Form entbunden wird.

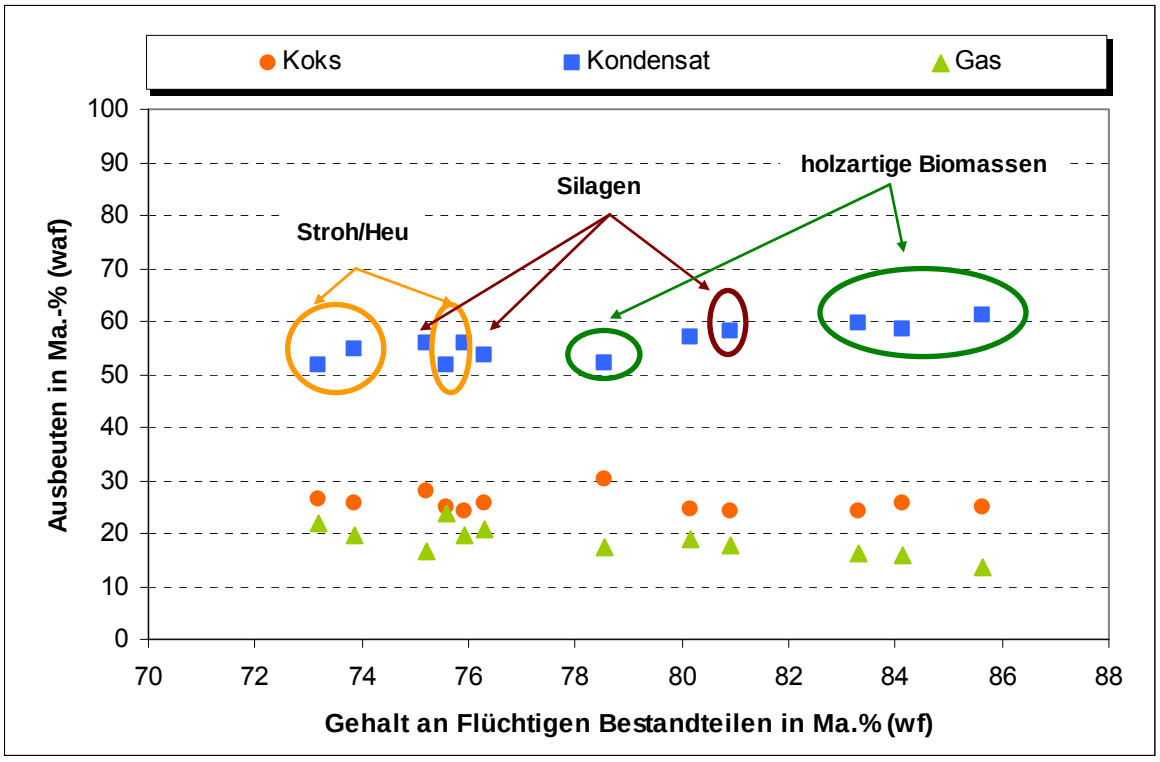


Abbildung 4-49: **Ausbeuten an Koks, Kondensat und Gas bei der Biomassepyrolyse bei 500 °C in Abhängigkeit des Gehaltes an flüchtigen Bestandteilen im Einsatzstoff (Bedingungen: Festbett, Schnellaufheizung, Körnung < 2 mm)**

Hier ergeben sich ebenfalls wieder Zusammenhänge mit der Stoffgruppenzusammensetzung. Die cellulosereicheren Hölzer (ca. 43 Ma.-% wf) bilden vermehrt Flüssigpro-

dukte, während die eher hemicellulose- und extraktstoffreichen Halmgüter/Silagen höhere Gasmengen produzieren. Dabei ist innerhalb dieser Rohstoffgruppe auch der Effekt katalytisch aktiver Elemente auf die Zersetzung zu berücksichtigen.

Veränderungen in der Produktzusammensetzung lassen sich ebenfalls mit dem Flüchtigengehalt der Biomassen korrelieren (s. Abbildung 4-50 am Beispiel der Teer/Öl-Zusammensetzung). So ergeben sich sinkende Kohlenstoff- (-4 Ma.-% wf) und steigende Sauerstoffgehalte (+6,5 Ma.-%) im organischen Flüssigprodukt bei zunehmendem Flüchtigengehalt. Dieser Trend ist nicht mit steigenden Sauerstoffgehalten der Biomassen zu begründen, sondern liegt vielmehr in den Bindungsformen des Sauerstoffs in der organischen Matrix. Beim Wasserstoff ist lediglich eine leichte Abnahme hin zu den holzartigen Biomassen festzustellen.

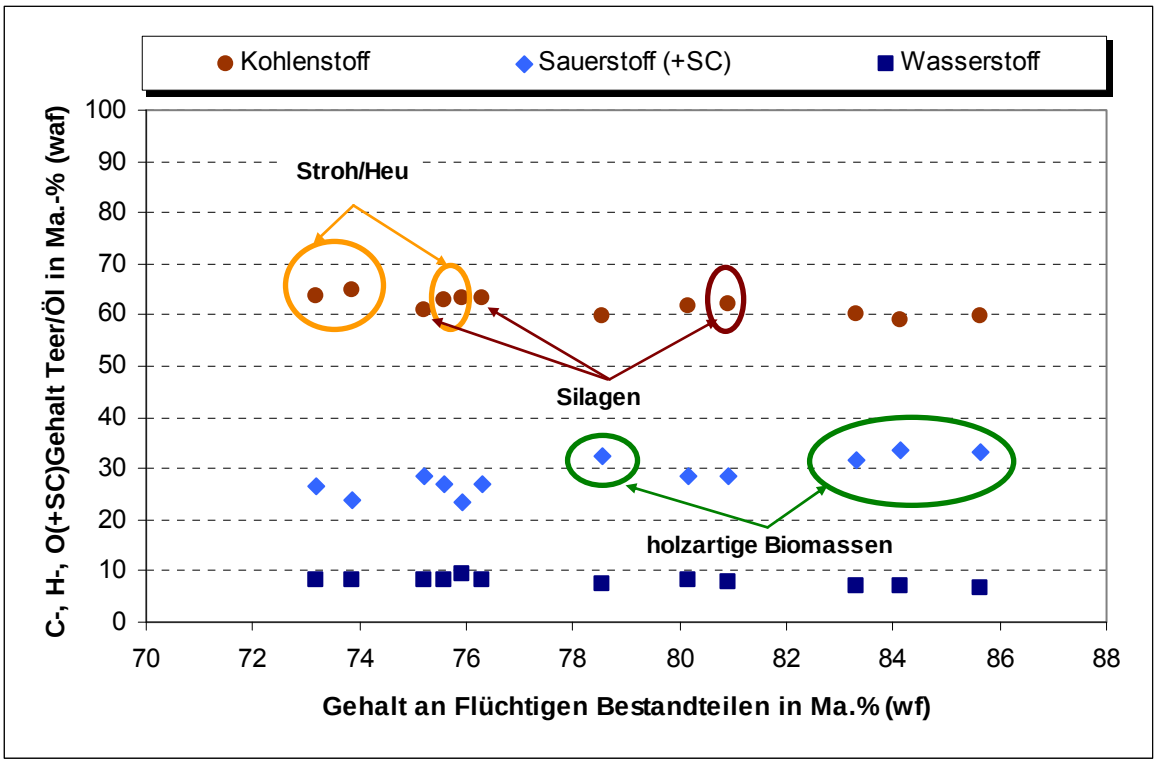


Abbildung 4-50: **Kohlenstoff- und Sauerstoffgehalt im Teer/Öl bei der Biomassepyrolyse bei 500 °C in Abhängigkeit des Gehaltes an flüchtigen Bestandteilen im Einsatzstoff (Bedingungen: Festbett, Schnellaufheizung, Körnung < 2 mm)**

Für den Koks ergibt sich mit steigendem Flüchtigengehalt des Rohstoffes eine leichte Zunahme des Anteils an fixem Kohlenstoff (+2,2 Ma.-% waf).

Auch an der Zusammensetzung des Pyrolysegases lassen sich für die verschiedenen Einsatzstoffe Unterschiede erkennen (s. Abbildung 4-51). Dabei scheint weniger der Anteil flüchtiger Bestandteile dafür verantwortlich. Vielmehr lassen sich Trends für die verschiedenen Biomassegruppen ableiten:

- Kohlenmonoxidanteil: Stroh/Heu > Silage/Ganzpflanze > Hölzer;
- Kohlendioxidanteil: Hölzer > Silage/Ganzpflanze > Stroh/Heu;
- Methananteil: Hölzer > Silage/Ganzpflanze = Stroh/Heu.

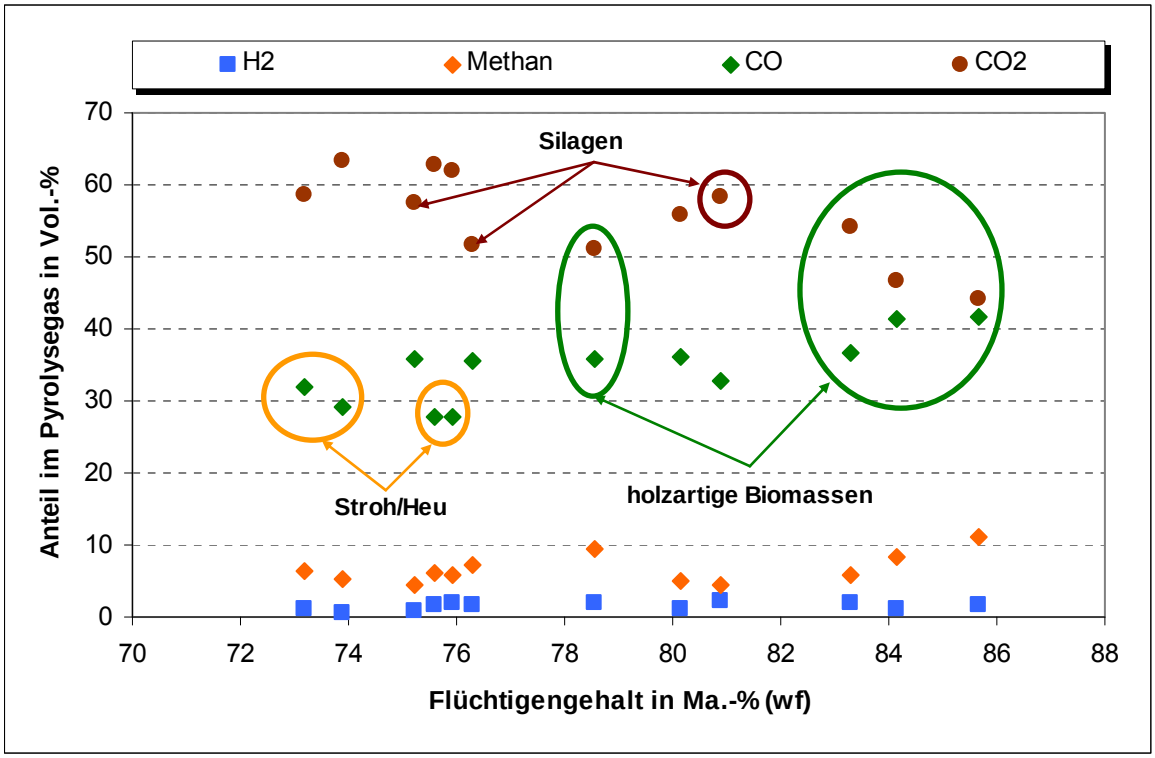


Abbildung 4-51: **Anteile der Hauptkomponenten im Gas bei der Biomassepyrolyse bei 500 °C in Abhängigkeit des Gehaltes an flüchtigen Bestandteilen im Einsatzstoff (Bedingungen: Festbett, Schnellaufheizung, Körnung < 2 mm)**

Die Ergebnisse zeigen, dass bei den holzartigen Biomassen offensichtlich bevorzugt Decarboxlierungsreaktion, welche zur CO_2-Bildung führen, ablaufen. Dies könnte z. B. auf einen höheren Anteil an Carboxylgruppen in der organischen Matrix hindeuten, welche zu einem großen Teil in Hemicellulosen (als Uronsäuren) vorkommen. Auch die Methylgruppenabspaltung scheint bei den holzartigen Biomassen begünstigt.

Für die C2- und C3-Kohlenwasserstoffe ergeben sich für alle Biomassen ähnliche Rohstoffe, was bedeutet, dass hier unabhängig von den Rohstoffeigenschaften die gleichen Mechanismen ursächlich für die Freisetzung sind.

4.2.2 Einfluss des Gehalts an katalytisch aktiven Aschebestandteilen

Um Unterschiede im Pyrolyseverhalten in Abhängigkeit von Aschegehalt und -zusammensetzung feststellen zu können, ist es günstiger eine Biomasseart zu betrachten. Nachfolgend wird daher kurz auf die Unterschiede im Pyrolyseverhalten zwischen Weizenstroh (2275) und grauem Weizenstroh (2297) eingegangen. Das graue Weizenstroh zeichnet sich dabei durch längere Feldliegezeiten aus, welche zu einer Auswaschung von Kalium und Chlor aus der Biomasse geführt haben. Die beiden Weizenstrohchargen weisen ansonsten die gleichen Zusammensetzungen (Elementar-, Immediatanalyse) auf. Die Gehalte an Kalium und Chlor (bezogen auf trockene Biomasse) sind hingegen beim grauen Weizenstroh um etwa 50 % reduziert.

Bei Betrachtung der Pyrolyseproduktverteilung (s. Abbildung 4-52) fallen einige Unterschiede auf. Die Phase der Hauptzersetzung ist bei der Pyrolyse des grauen Weizenstrohs um ca. 20 bis 25 K zu einer höheren Temperatur verschoben. Dies wird auch in

der Literatur bestätigt /Jensen1998/, /DiBlasi2000/, /Reichel2007/. Bis 400 °C ist für beide Einsatzstoffe die Hauptmenge der flüchtigen Bestandteile entbunden. Die demineralisierte Weizenstrohcharge zeigt eine geringer Gasausbeute (-2…5 Ma.-% waf) bei gleichzeitig höherer Ausbeute an Flüssigprodukten (+2…5 Ma.-% waf), welche auf einen Anstieg des organischen Anteils zurückzuführen ist. Für diese Verschiebung in der Produktverteilung ergeben sich zwei mögliche Erklärungen: Zum einen wäre es denkbar, dass während der längeren Feldliegezeit bereits ein teilweiser Abbau der Hemicellulosen stattgefunden hat (Auswaschen von Säuregruppen, da diese leicht hydratisiert werden) und deren Gehalt in der Biomasse somit gegenüber dem Weizenstroh (gelb) verringert ist. Da Hemicellulosen bei der thermischen Zersetzung zuerst abgebaut werden, könnte dies die Temperaturverschiebung der Hauptphase der Pyrolyse verursachen. Zum anderen bildet Hemicellulose beim thermischen Abbau ggü. von Cellulose vermehrt Gase (s. Kapitel 4.1.8, S. 101), was die Verschiebung in der Produktverteilung bewirken könnte. Eine weitere Möglichkeit zur Begründung der Unterschiede ergibt sich aus den verschiedenen Gehalten an Kalium im Einsatzstoff (WS, grau 0,86 ggü. WS, gelb 1,75 Ma.-% wf). Kalium wird eine katalytische Wirkung bei primären Koksbildungsreaktionen zugeschrieben. Di Blasi et al. berichten von einer Erhöhung der Kondensatausbeute zumeist zuungunsten des Kokses bei der Pyrolyse von Weizenstroh und demineralisertem Weizenstroh (bei Temperaturen < 530 °C auch verstärkte Gasbildung) /DiBlasi2000/. In früheren Untersuchungen konnte dieser Effekt ebenfalls festgestellt werden /Reichel2007/. Ähnliche Aussagen finden sich für demineralisierte Braunkohle in /Otake1993/. Begründet wird dieser Effekt mit der Hemmung primärer Koksbildungsreaktionen (exotherm) durch die Verschiebung der Hauptzersetzungsphase zu höheren Temperaturen /DiBlasi2000/.

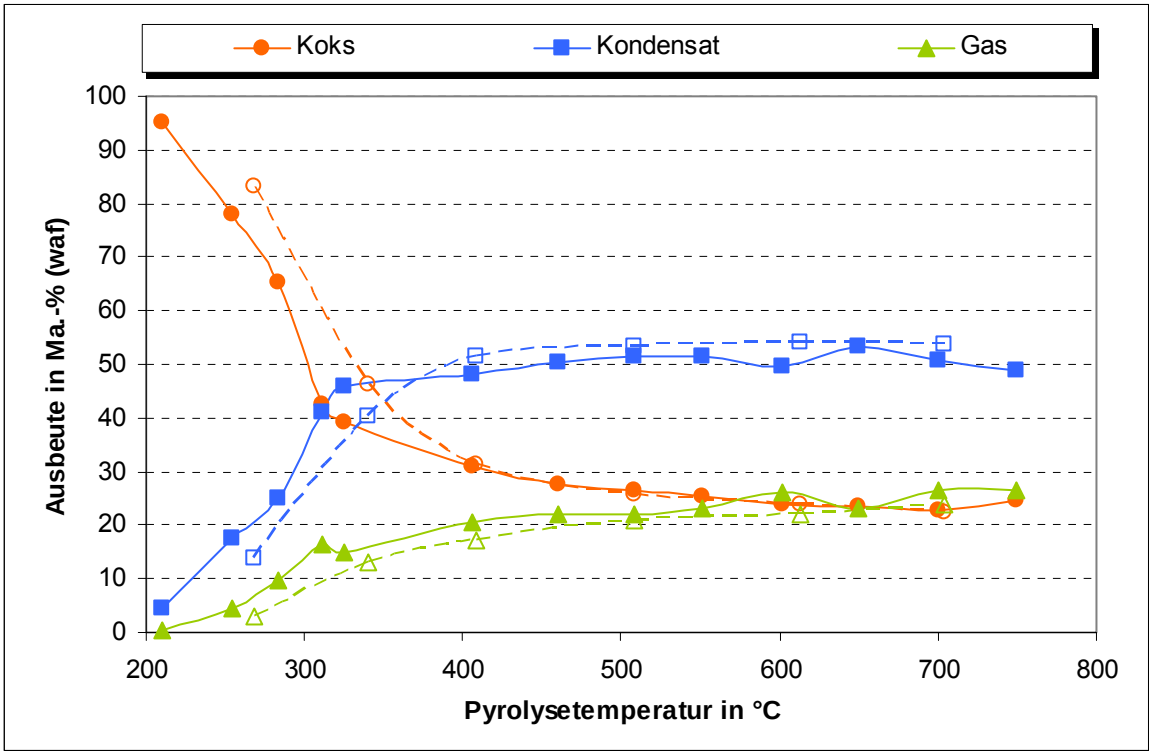


Abbildung 4-52: **Produktverteilung bei der Pyrolyse von Weizenstroh (2275) und Weizenstroh (grau, 2297) in Abhängigkeit von der Temperatur im Festbettreaktor** *(ausgefüllte Zeichen: Weizenstroh (2275); umrandete Zeichen: Weizenstroh (grau, 2297))*

Bei der Zusammensetzung des Pyrolysegases zeigt sich, dass die Pyrolyse des kaliumreicheren Weizenstrohs höhere Anteile an CO_2 und geringere an CO liefert. Zudem konnten höhere Wasserstoffgehalte festgestellt werden, während Methan unbeeinflusst bleibt. Betrachtet man hingegen die Gasausbeuten, so entbindet das graue Weizenstroh bei Temperaturen über 450 °C mehr Kohlenmonoxid (s. Abbildung 4-53). In der Literatur hingegen wurden bezüglich CO, CO_2, CH_4 und H_2 geringere Ausbeuten bei der Pyrolyse des demineralisierten Weizenstrohs festgestellt /Jensen1998/. Insbesondere bei höheren Temperaturen (ab 600 °C) wird der höhere Anteil an CO und H_2 bei Anwesenheit von Kalium mit dessen katalytische Beeinflussung der heterogenen Wassergasreaktion begründet. Untersuchungen zum Verhalten der Biopolymere unter Anwesenheit von KCl ergaben, dass der Einfluss auf die Ausbeuten der Gaskomponenten bei Cellulose am größten ist /Jensen1998/.

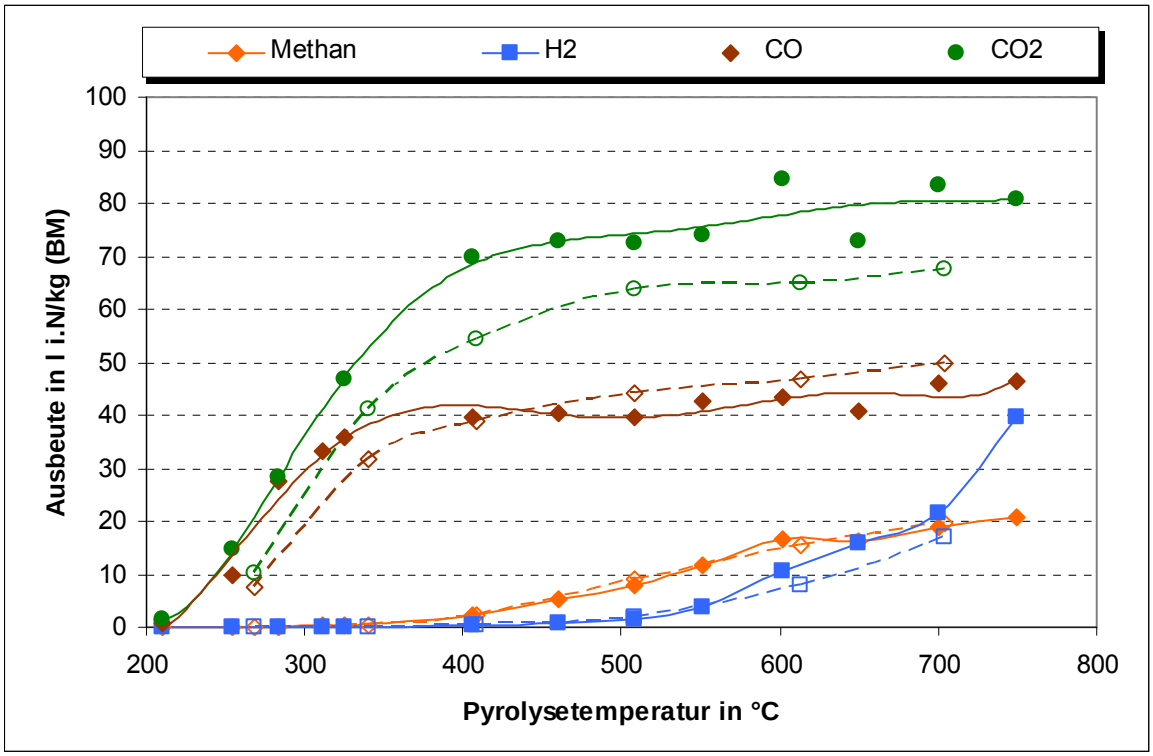


Abbildung 4-53: **Ausbeuten der Hauptgaskomponenten bei der Pyrolyse von Weizenstroh (2275) und Weizenstroh (grau, 2297) in Abhängigkeit von der Temperatur im Festbettreaktor** *(durchgezogene Linie: Weizenstroh (2275); gestrichelte Linie: Weizenstroh (grau, 2297))*

Bei der Pyrolyse der beiden untersuchten Weizenstrohqualitäten tritt vermutlich eine Überlagerung des Effektes der veränderten Stoffgruppenzusammensetzung und des Kaliumgehaltes ein. Der wahrscheinlich geringere Hemicelluloseanteil bei Weizenstroh, grau bedeutet, dass sich der Gehalt an Säuregruppen reduziert hat, da diese Stoffgruppe neben Zuckern aus Uronsäuren besteht. Dies führt bei der Pyrolyse zu einer verringerten Entbindung von CO_2 aus Decarboxylierungsreaktionen der Säuregruppen. Das Fehlen der Säuregruppen bewirkt außerdem eine schlechtere Vernetzung der Hemicellulose, da sich Wasserstoffbrückenbindungen in geringerem Maß ausbilden. Dies führt zu einer Verschiebung des Zersetzungsbereiches zu höheren Temperaturen, wobei sich in der Massenänderungsgeschwindigkeit ein schärferer Peak ausbildet (s. Anhang K Abb Anhang K-8). Katalytische Effekte auf die Pyrolyse sind dennoch nicht auszuschließen.

Bei den Ausbeuten an C2- und C3-Kohlenwasserstoffen ergeben sich für Ethan und Ethen deutliche Unterschiede zwischen den beiden Weizenstrohqualitäten (s. Abbildung 4-53). Propan und Propen hingegen bleiben unbeeinflusst und sind somit auf die gleichen Entbindungsmechanismen zurückzuführen. Die Ausbeuten an Ethan und Ethen liegen bei der Pyrolyse des demineralisierten Weizenstrohs deutlich höher (Ethan: +0,5…1,2 l i.N./kg (BM); Ethen: 1,0…1,8 l i.N./kg (BM)). Ähnliche Auswirkungen traten auch in früheren Untersuchungen auf /Reichel2007/. Zudem beginnt die Entbindung ggü. dem kaliumreichen Weizenstroh bei wesentlich tieferen Temperaturen (ca. 280 °C ggü. 340 bzw. 400 °C). Ethan und Ethen resultieren bei der Pyrolyse überwiegend aus der Abspaltung von Bruchstücken aus Seitenketten der aromatischen Ringe im Lignin, dessen Zersetzung jedoch erst bei Temperaturen um 250 bis 300 °C beginnt (s. Kapitel 4.1.8, S. 101). Die genaue Ursache dieses Effektes konnte im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen nicht geklärt werden.

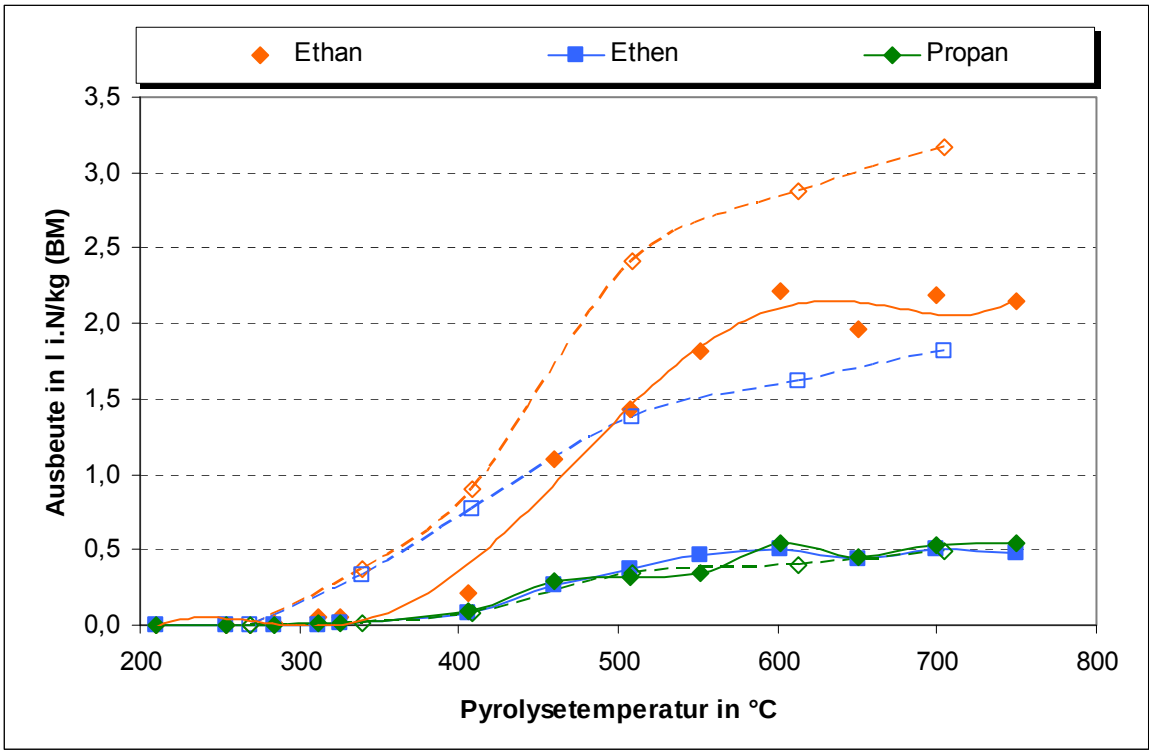


Abbildung 4-54: **Ausbeuten der C2- und C3-Kohlenwasserstoffe bei der Pyrolyse von Weizenstroh (2275) und Weizenstroh (grau, 2297) in Abhängigkeit von der Temperatur im Festbettreaktor** *(durchgezogene Linie: Weizenstroh (2275); gestrichelte Linie: Weizenstroh (grau, 2297))*

Abschließend soll der Einfluss der Strohqualität auf die Bilanz der chemisch gebundenen Energie diskutiert werden (s. Abbildung 4-55). Für das graue Weizenstroh ergeben sich in Abhängigkeit der Pyrolysetemperatur Differenzen in der chemisch gebundenen Energie zwischen Produkten und Edukten zwischen +10 und -277 kJ/kg (wf). Es zeichnet sich somit ein schwach exothermer Verlauf ab. Die Pyrolyse des kaliumreicheren Weizenstrohs zeigt bis ca. 350 °C einen endothermen Verlauf (bis +398 kJ/kg wf). Bei höheren Temperaturen (bis 500 °C) nimmt die Exothermie deutlich zu (-1.602 kJ/kg wf) und verringert sich anschließend wieder. Der Effekt der verringerten Exothermie zeigte sich auch in den Untersuchungen mittel TG-DSC (s. Abbildung 4-59, S. 127). In früheren Untersuchungen konnte für die Pyrolyse von grauem Weizenstroh sogar ein schwach endothermer Verlauf festgestellt werden /Reichel2007/.

Verschiedene Studien zeigen, dass exotherme Erscheinungen bei der Pyrolyse auf primäre Koksbildungsreaktionen infolge von Kondensationsreaktionen (Dehydrierung) zurückzuführen sind, wohingegen die endotherme Wärmetönung mit der Bildung von primären flüchtigen Produkten in Verbindung gebracht wird /Mok1983/, Milosavljevic1996/, /Rath2003/. Zudem soll Kalium die primären Koksbildungsreaktionen katalysieren. Das graue Weizenstroh liefert höhere Ausbeuten an flüssigen Pyrolyseprodukten, was demnach mit einer höheren endothermen Wärmetönung verbunden ist. Die deutlich höhere Exothermie der Pyrolysereaktionen des kaliumreicheren Weizenstrohs lassen sich hingegen nicht mit einer Begünstigung der Koksbildung begründen, da die Ausbeuten dieses Produktes für beide Rohstoffe in einer ähnlichen Größenordnung liegen. Möglicherweise erfolgt hier verglichen mit dem demineralisierten Weizenstroh bereits ein stärkerer Abbau des Lignins (exotherme Wärmetönung, s. Abbildung 4-60, S. 129), was auch die höhere Ausbeute an Wasserstoff (s. Abbildung 4-53) erklären könnte.

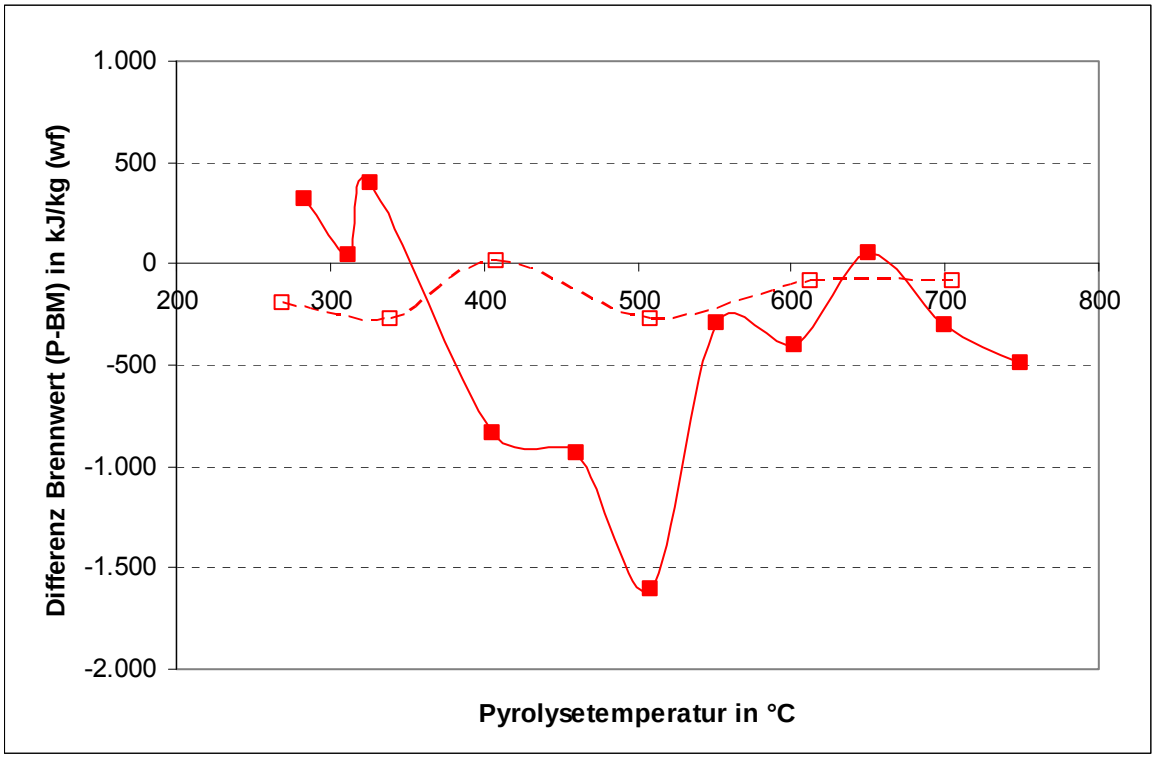


Abbildung 4-55: **Differenz zwischen Brennwert der Produkte und dem Einsatzstoff bei der Pyrolyse von Weizenstroh (2275) und Weizenstroh (grau, 2297) in Abhängigkeit von der Temperatur im Festbettreaktor** *(durchgezogene Linie: Weizenstroh (2275); gestrichelte Linie: Weizenstroh (grau, 2297))*

Zusammenfassend kann für die Pyrolyse der beiden Weizenstrohqualitäten festgestellt werden, dass sich Unterschiede in der Produktverteilung, der Gaszusammensetzung sowie der Bilanz der chemisch gebundenen Energien ergeben, welche auf einen teilweisen Abbau der Hemicellulosen infolge der längeren Feldliegezeit beim grauen Weizenstroh zurückzuführen sind. Ob weiterhin auch Effekte aufgrund des unterschiedlichen Kaliumgehaltes auftreten, konnte im Rahmen dieser Untersuchungen nicht aufgeklärt werden.

Generell ist es schwierig Korrelationen von Produktverteilung und -zusammensetzung mit Rohstoffeigenschaften abzuleiten, da sich häufig verschiedenen Eigenschaften in ihren Effekten bei der Pyrolyse überlagern. Innerhalb bestimmter Biomassegruppen, wie z. B. Holz, Stroh oder den Silagen lassen sich Auswirkungen z. B. zum Einfluss der Aschezusammensetzung wesentlich besser bestimmen. Bei Betrachtung der gesamten Vielfalt der Biomassearten lassen sich Korrelationen in Abhängigkeit der Stoffgruppen-zusammensetzung sowie z. B. dem Flüchtigengehalt ableiten, wobei jedoch immer wieder einzelne Ausnahmen auftreten können.

4.3 Ergänzende thermoanalytische Untersuchungen

Abschließend werden die Ergebnisse der ergänzenden thermoanalytischen Untersuchungen zum Pyrolysewärmebedarf, den Masseverlustkurven und der Massenänderungsgeschwindigkeit bei der Pyrolyse diskutiert.

4.3.1 Einflussgrößen bei der Differential-Scanning-Kalorimetrie

Zur Ermittlung von Reaktionsenthalpien bei der Pyrolyse von Biomasse mittels TG-DSC wurden zunächst einige systematische Untersuchungen zum Einfluss verschiedener Parameter wie Aufheizgeschwindigkeit, Einwaage, Körnung, zum Verhalten mit/ohne Deckel auf dem Tiegel und zur Wiederholbarkeit durchgeführt.

Die Messungen zur Wiederholbarkeit erfolgten mit Calciumoxalat ($CaC_2O_4x2H_2O$) als definierte Substanz mit bekanntem Zersetzungsverhalten (inerte Atmosphäre):

- Peak 1: ca. 190 °C Wasserabspaltung (endotherme Reaktion),
- Peak 2: ca. 520 °C Abspaltung von Kohlenmonoxid (endotherme Reaktion),
- Peak 3: ca. 750 °C Abspaltung von Kohlendioxid (endotherme Reaktion).

Die maximale prozentuale Standardabweichung für den bei der Biomassepyrolyse relevanten mittleren Temperaturbereich (Peak 1, Peak2) wurde mit 2,9 % bestimmt.

Einfluss von Aufheizgeschwindigkeit und Partikelgröße

Bei der Zersetzung von Calciumoxalat unter Stickstoffatmosphäre konnte für die untersuchten Aufheizraten von 10, 20 und 40 K/min kein signifikanter Einfluss auf die Reaktionsenthalpie festgestellt werden (s. Abbildung 4-56). Lediglich die Werte für die Peaktemperaturen steigen bei erhöhter Aufheizgeschwindigkeit.

Anders sieht dies bei der Pyrolyse von Weizenstroh aus (s. Abbildung 4-57). Hier ergeben sich in Abhängigkeit von der Partikelgröße bzw. Partikelgrößenklasse unterschiedliche Einflüsse. Bei Partikelgrößen < 0,1 mm und < 2 mm liefern die mittleren Aufheizraten von 20 K/min die höchsten Werte für die Reaktionsenthalpie. Bei den gröberen Partikeln (1-2 mm und 5-6 mm) ergibt sich zwischen 10 und 20 K/min kein signifikanter Einfluss, bei 40 K/min liegen die Werte jedoch deutlich höher. Die Unterschiede in den Reaktionsenthalpien bei verschiedenen Aufheizraten für die Pyrolyse von Weizenstroh gegenüber den Untersuchungen mit Calciumoxalat ergeben sich aufgrund der Struktur der Einsatzstoffe. Calciumoxalat als definierte Substanz unterliegt unter Stickstoffatmosphäre den oben genannten drei Zersetzungsmechanismen. Bei der Pyrolyse von Weizenstroh laufen aufgrund des komplexen makromolekularen Aufbaus eine Vielzahl verschiedener Reaktionsmechanismen ab, die mit Variation der Verweilzeit und auch der Partikelgröße begünstigt oder gehemmt werden können. Bei höheren Aufheizgeschwindigkeiten ist dabei schneller mehr Energie für die Bindungsspaltung verfügbar, so dass Bindungen nicht selektiv nach Höhe ihrer Bindungsenergien gespalten werden, sondern die Zersetzungsreaktionen dort ablaufen wo gerade ein hohes Energieangebot vorherrscht.

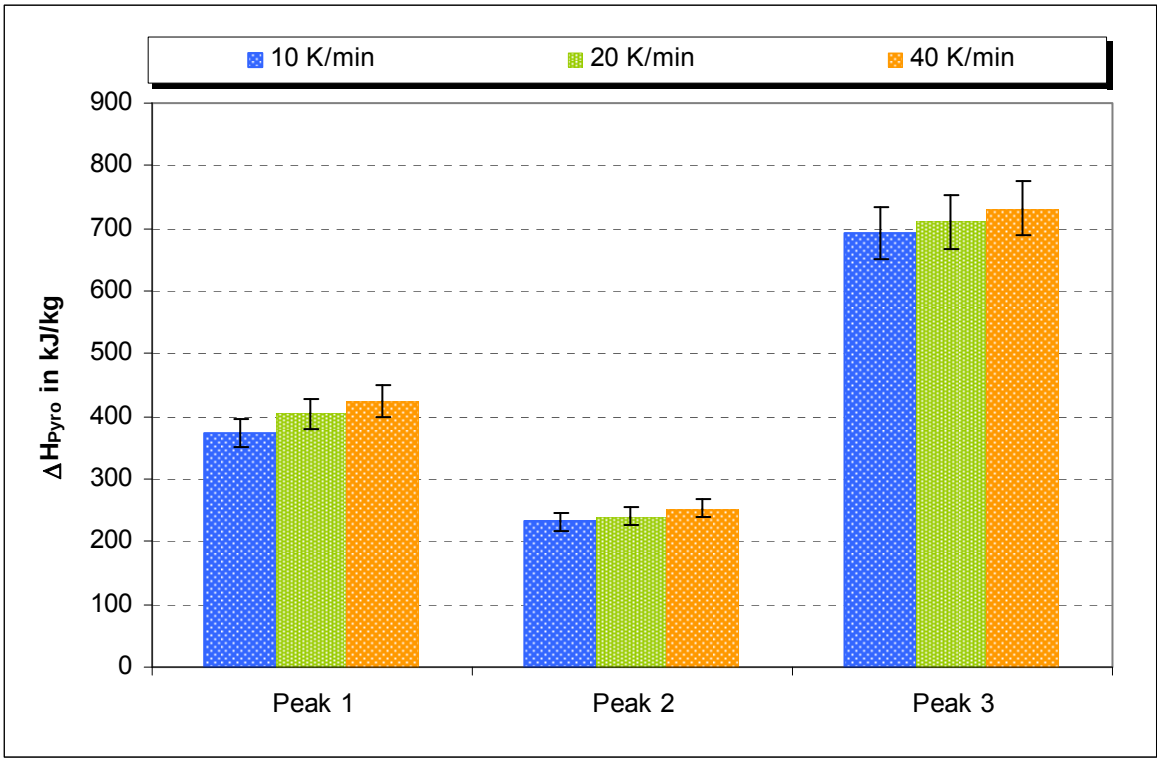


Abbildung 4-56: **Einfluss der Aufheizgeschwindigkeit bei der Zersetzung von Calciumoxalat unter Stickstoffatmosphäre (Gerät: TG-DSC Netzsch STA 409)**

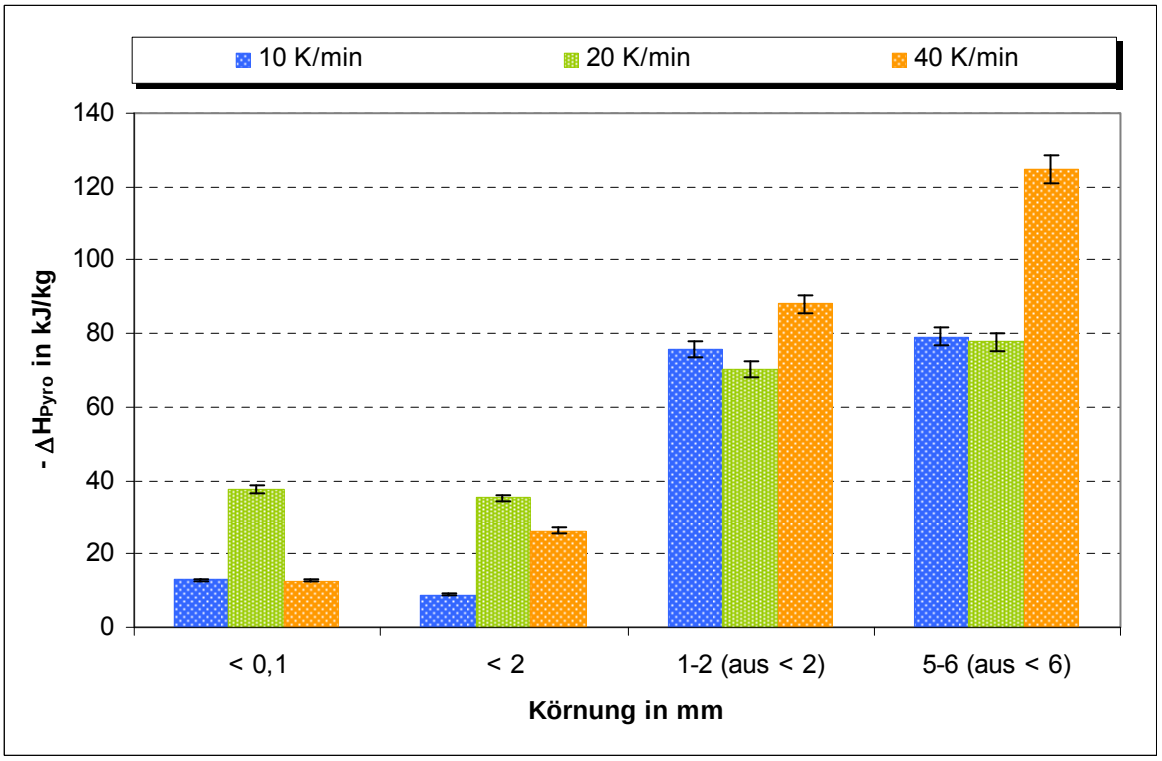


Abbildung 4-57: **Einfluss von Aufheizgeschwindigkeit und der Partikelgröße auf die Reaktionsenthalpie bei der Pyrolyse von Weizenstroh (2275) (Gerät: TG-DSC Netzsch STA 409)**

Zum Einfluss der Partikelgröße lässt sich festhalten, dass die gröberen Körnungen um ein Vielfaches höhere Werte für die Reaktionsenthalpie aufweisen. Für 10 und 20 K/min ergeben sich die Unterschiede dabei nur zwischen der groben (1-2 mm und

5-6 mm) und den kleinen Fraktionen (< 0,1 und < 2 mm) bei 40 K/min steigen die Reaktionsenthalpien von der kleinsten zur größten Körnung an.

Um Werte für verschiedene Biomassen vergleichen zu können, wurden einheitliche Bedingungen für die Untersuchungen mittels TG-DSC festgelegt. Für die Partikelgröße wurde die Fraktion < 2 mm ausgesucht, da auch die Untersuchungen zum Pyrolyseverhalten in Abhängigkeit von verschiedenen Bedingungen mit diesem Korngrößenbereich durchgeführt wurden. Als Aufheizgeschwindigkeit wurden 20 K/min gewählt, da dort die Peaks bereits gut ausgebildet sind und die Verschiebung der Zersetzungsbereiche zu höheren Temperaturen noch nicht so stark ausgeprägt ist.

Einfluss der Einwaage

Die Untersuchungen mit Calciumoxalat als Einsatzstoff ließen im für die Biomasse relevanten Temperaturbereich (Peak 1, Peak 2, s. Abb Anhang K-1) keinen signifikanten Einfluss der Einwaage auf die Höhe der Reaktionsenthalpie erkennen. Bei der Pyrolyse von Weizenstroh sind die Unterschiede zwar gering jedoch signifikant (s. Tabelle 4-8). Dies hängt wiederum mit den ablaufenden Mechanismen zusammen. Größere Schüttungen bedeuten längere Wege für den Wärme- und Stofftransport. Letzteres erhöht die Verweilzeit der entstehenden flüchtigen Komponenten in der Biomasseschüttung und begünstigt dadurch sekundäre Pyrolysereaktionen, die natürlich mit entsprechenden Wärmetönungen verbunden sind.

Tabelle 4-8: Reaktionsenthalpie bei der Pyrolyse von Weizenstroh (2275, Körnung: < 2 mm) für verschiedene Einwaagen (Gerät: TG-DSC Netzsch STA 409; Aufheizrate: 20 K/min)

Reaktionswärme	1,1 mg (Boden bedeckt)	5,4 mg (halb voll) in kJ/kg	11,1 mg (voll)
Peak 1 (ca. 350 °C)	43,7±1,3	46,1±1,3	51,7±1,5

Für weitere Untersuchungen wurden Einwaagen von 7-10 mg (halbvoller Tiegel) gewählt.

Pyrolyse mit und ohne Deckel

Der Probentiegel kann bei Bedarf mit einem Deckel versehen werden. Dies hat den Vorteil, dass sich die Wärme besser in der Probenschüttung verteilt und sich die Peaks besser ausbilden können. Für die Pyrolyse ist diese Vorgehensweise jedoch nicht erstrebenswert, da durch den Deckel die Verweilzeit der aus der Schüttung austretenden flüchtigen Bestandteile in der heißen Zone erhöht wird. Dies führt zu sekundären Pyrolysereaktionen innerhalb der Flüchtigen sowie zwischen Flüchtigen und Feststoff. Es ist davon auszugehen, dass der Einfluss der sekundären Pyrolysereaktionen auf die Reaktionsenthalpie wesentlich höher ausfällt als der der besseren Wärmeverteilung.

Die Einflüsse sind sowohl bei Calciumoxalat (Abb Anhang K-2) als auch bei Weizenstroh erheblich. Die Werte der Reaktionsenthalpie steigen bei Benutzung eines Deckels auf über das Doppelte an (s. Tabelle 4-9).

Da die sekundären Pyrolysereaktionen für das Untersuchungsziel nicht erwünscht sind, wurden die Untersuchungen mit TG-DSC ohne Deckel auf dem Probentiegel durchgeführt.

Tabelle 4-9: Reaktionsenthalpie bei der Pyrolyse von Weizenstroh (2275, Körnung: < 2 mm) mit und ohne Deckel (Gerät: TG-DSC Netzsch STA 409; Aufheizrate: 20 K/min)

	mit Deckel	ohne Deckel
Reaktionswärme	in kJ/kg	
Peak 1 (ca. 350 °C)	76,9	35,4

4.3.2 Ergebnisse der Differential-Scanning-Kalorimetrie

Die ermittelten DSC-Kurvenverläufe sind in Abbildung 4-58 exemplarisch für die holzartigen Biomassen dargestellt. Die Lage der Kurven wird dabei von den Änderungen der Wärmekapazitäten des Feststoffes bestimmt. Bei Temperaturen über 1.000 °C spielen zusätzlich Effekte der Wärmestrahlung eine Rolle. Für die Bestimmung von Reaktionsenthalpien werden nur die Flächen der sich ausbildenen Peaks ausgewertet. Dabei können sowohl sehr scharfe/deutliche Peaks (enger Temperaturbereich, Bsp.: Sägerestholz, 2276 in Abbildung 4-58) aber auch sehr langgezogene Peaks entstehen, je nachdem, welche Zersetzungsmechanismen ablaufen. Generell ist immer von einer Überlagerung einer Vielzahl von ablaufenden Reaktionen auszugehen. Die erhaltenen Reaktionsenthalpien ergeben sich somit aus der Summe aller exothermen und endothermen Wärmetönungen der ablaufenden Reaktionen in diesem Temperaturbereich. Die Auswertung der einzelnen Peaks erfolgte mit der Auswertesoftware des Gerätes. Dazu wurden manuell der Start- und Endpunkt des Peaks unter Zuhilfenahme der 1. Ableitung der DSC-Kurve festgelegt. Die Software berechnet neben der Fläche unter dem Peak, die sogenannte Onsettemperatur sowie die Peaktemperatur und gibt die Temperatur am Peakende aus. Die Onsettemperatur beschreibt den Punkt, an dem die in den Anstieg des Peaks gelegte Tangente die Basislinie schneidet. Die Peaktemperatur kennzeichnet die Temperatur im Peakmaximum.

Die Untersuchungen an den holzartigen Biomassen ergaben ausnahmslos endotherme Reaktionsenthalpien im Temperaturbereich zwischen 300 und 400 °C, wohingegen die pelletierten Weizenstrohproben (s. Abbildung 4-59) exotherme Reaktionsenthalpien bei etwas niedrigeren Temperaturen zeigten. Auch sind die Peaks bei letzteren nicht so deutlich ausgeprägt. Die als Halme vorliegenden Einsatzstoffe zeigten in den DSC-Kurven keine (Weizenstroh, grau) oder nur sehr gering ausgeprägte Effekte (Weizenstroh, gelb; Rapsstroh) (s. Abbildung 4-59). Dies hängt vermutlich maßgeblich damit zusammen, dass infolge der geringen Dichte dieser Einsatzstoffe nur sehr wenig Material in den Probentiegel eingebracht werden konnte und folglich die Wärmeströme bzw. Temperaturveränderungen unterhalb der Empfindlichkeit des Gerätes lagen.

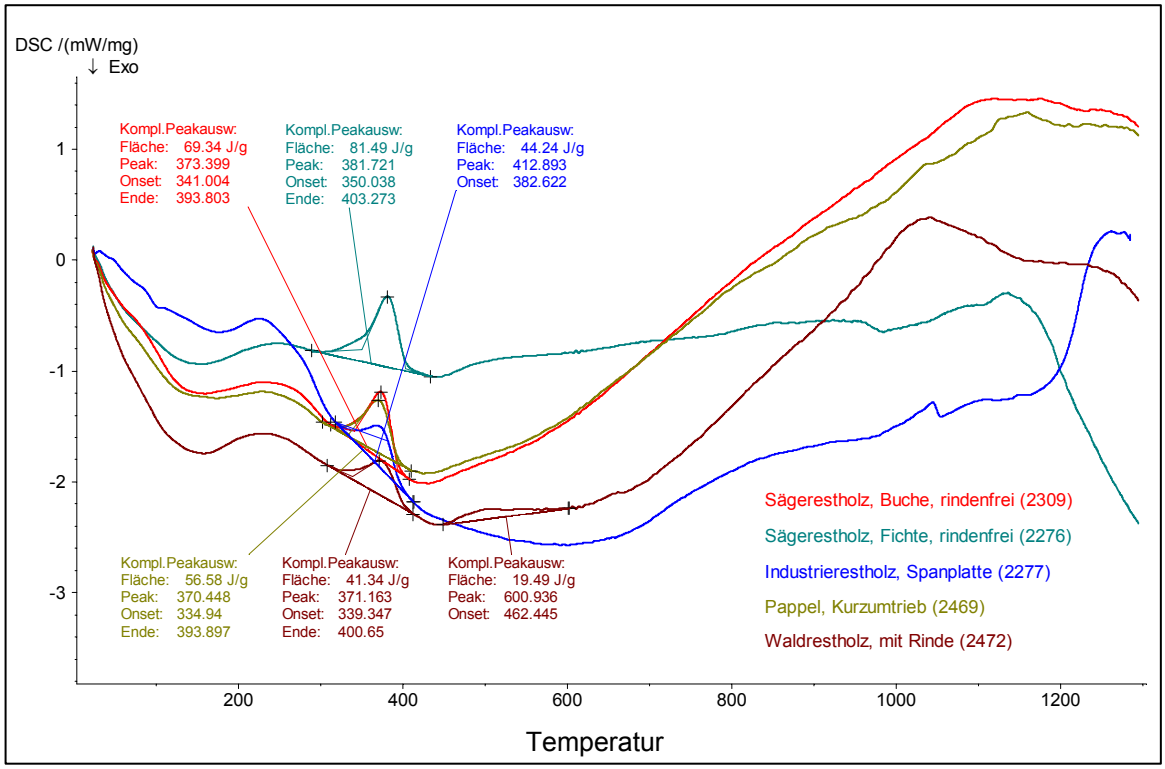
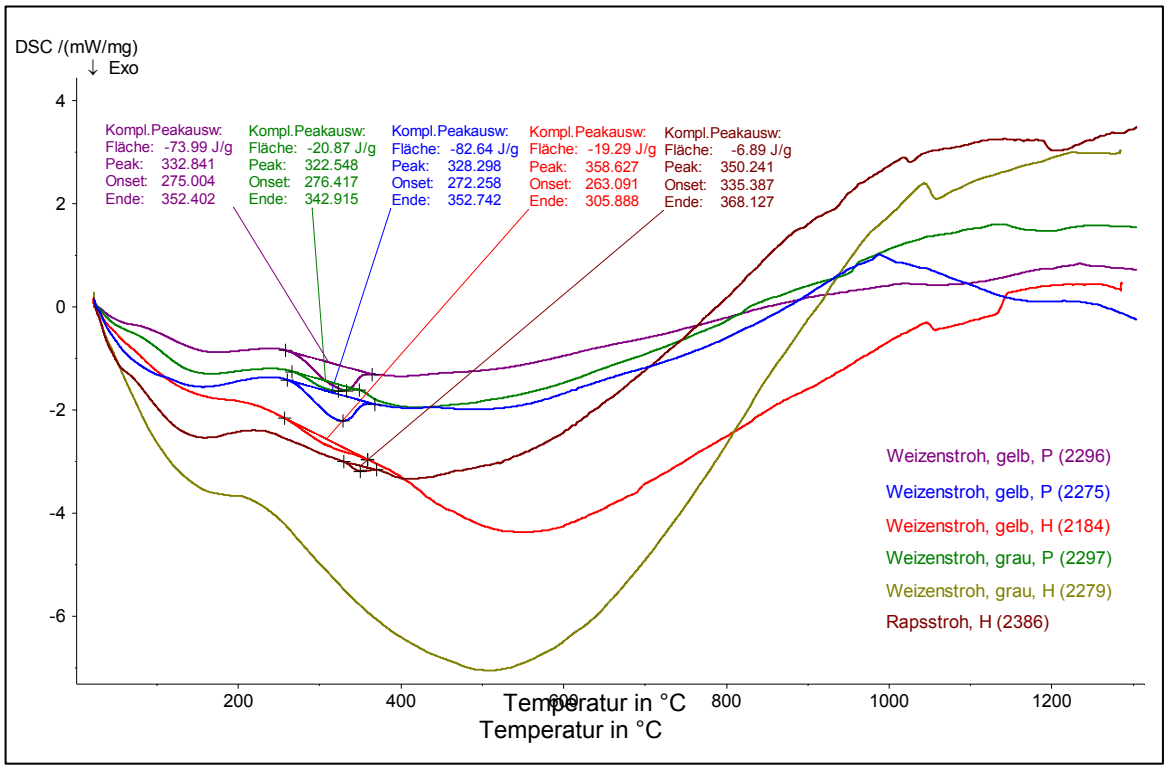


Abbildung 4-58: **DSC-Signale der holzartigen Biomassen bei einer Aufheizrate von 20 K/min (Gerät: Netzsch STA 409 C, Endtemperatur: 1.300 °C, Körnung: < 2 mm)**



Temperatur in °C

Abbildung 4-59: **DSC-Signale der halmgutartigen Biomassen bei einer Aufheizrate von 20 K/min (Gerät: Netzsch STA 409 C, Endtemperatur: 1.300 °C, Körnung: < 2 mm)**

Wesentlich deutlicher ausgeprägte Peaks ergeben sich bei der Pyrolyse der Biopolymere (s. Abbildung 4-60), da diese Substanzen verglichen mit den Biomassen wesentlich definierter sind. Dies trifft insbesondere auf die aus Glucoseketten aufgebaute Cellulose zu. Die untersuchte mikrokristalline Cellulose zeigt im Bereich zwischen 280 und 380 °C einen großen endothermen Effekt (456,2 kJ/kg). Dies wird in der Literatur /Yang2007/ bestätigt. Bei der Pyrolyse von Cellulose werden hauptsächlich flüchtige Bestandteile und nur ein geringer Anteil Koks gebildet. Für die Abspaltung der flüchtigen Komponenten (Gase und Kondensierbare) wird Energie benötigt – daher die stark endotherme Wärmetönung. Auch der untersuchte Fichte-Sulfit-Zellstoff zeigt eine endotherme Reaktionsenthalpie bei der Pyrolyse. Hier liegt der Wert mit 236,3 kJ/kg jedoch annähernd um die Hälfte niedriger. Auch die Peaktemperatur hat sich um 25 K zu einer höheren Temperatur verschoben. Ursache dafür ist, dass der Zellstoff keine reine Cellulose darstellt, sondern je nach Aufschlussgrad noch Reste an Lignin und Hemicellulosen enthält, deren Reaktionsenthalpien bei der Pyrolyse exotherm und somit gegenläufig zu der der Cellulose sind. Die zwei untersuchten Xylanproben (Vertreter der Hemicellulose) zeigen exotherme Reaktionsenthalpien (-232,6 bzw. -244,9 kJ/kg) mit Peaktemperaturen bei 300 °C. Das Auftreten des Doppelpeaks bei der Xylanprobe der Fa. Senn Chemicals (Schweiz) kann nicht geklärt werden, da die genaue Herkunft vom Hersteller nicht angegeben wurde. Hier ergibt sich weiterhin auch ein schwacher endothermer Effekt bei 544 °C, der vermutlich auf Abspaltung von Bruchstücken aus der Koksmatrix zurückgeführt werden kann. Bei der Xylanprobe der Fa. Sigma Aldrich (Birkenholz-Xylan) war in diesem Temperaturbereich kein auswertbarer Peak sichtbar.

Im Bereich der Hauptzersetzung dominieren bei der Pyrolyse der beiden Lignine exotherme Reaktionen, wobei das Lignin aus dem Organosolv-Aufschluss einen breiteren Peak (ca. 280 bis 480 °C, Maximum bei 427 °C) zeigt. Das Lignin aus dem Kraft-Aufschluss (Alkali-Lignin) zersetzt sich zwischen 320 und 420 °C (Maximum bei 372 °C). Auch die ermittelten Reaktionsenthalpien unterscheiden sich deutlich: -270,3 kJ/kg (Organosov-Lignin) und -166,6 kJ/kg (Alkali-Lignin). Das abweichende Verhalten resultiert aus den unterschiedlichen Aufschlussverfahren der Biomassen und u. U. auch aus der Art der Biomasse, da sich die Strukturen von Laub- und Nadelholzlignin voneinander unterscheiden. Die Art der für den Aufschluss verwendeten Biomasse wurde von den Herstellern nicht angegeben. Beim Organosolv-Verfahren wird mit Ethanol als Lösungsmittel gearbeitet. Der Prozess ist verglichen mit dem Kraft-Verfahren (Aufschluss mit Na_2S, Na_2SO_4 und NaOH) schonender und liefert somit ein weniger chemisch verändertes Lignin. Allerdings ist der Aufschluss nicht vollständig, sodass noch Reste von Hemicellulose oder Cellulose enthalten sein können.

Das Alkali-Lignin zeigt neben dem Peak in der Hauptphase der Pyrolyse zwei weitere Effekte: 38,8 kJ/kg bei 552 °C und -156,9 kJ/kg bei 837 °C. Die Herkunft des endothermen Peaks könnte auf die Abspaltung von Bruchstücken aus der Koksmatrix zurückzuführen sein oder auf mögliche Reaktionen der mineralischen Komponenten (überwiegend Natrium und Schwefel), die aus der Aufschlusschemikalie resultieren. Natriumsulfit beispielsweise zersetzt sich ab 500 °C.

Der exotherme Peak lässt sich schwieriger deuten. Zwar schmilzt Natriumsulfat bei Temperaturen von 888 °C und beginnt sich auch anschließend zu zersetzen, jedoch müssten diese Reaktionen exothermen Natur sein. Denkbar wäre weiterhin, dass der Effekt auf Umstrukturierungsreaktionen in der Koksmatrix zurückzuführen ist.

Exotherme Reaktionen bei der Pyrolyse werden in der Literatur mit den primären Koksbildungsreaktionen in Verbindung gebracht /Mok1983/, /Rath2003/, /Milosavljevic1996/. Hemicellulose und Lignin liefern bei der Pyrolyse verglichen mit der Cellulose deutlich höhere Koksmengen (s. Kapitel 4.1.8). Auch in der Literatur werden die Reaktionsmechanismen derart beschrieben /Yang2007/, /Khezami2005/.

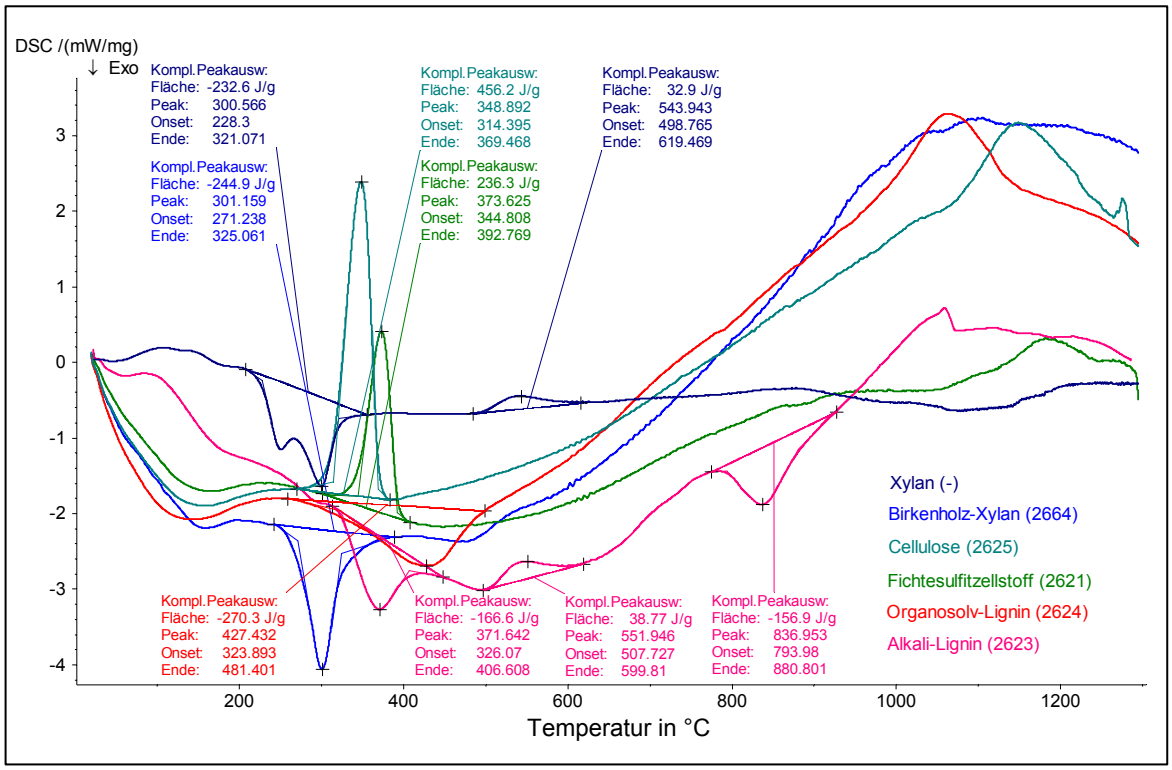


Abbildung 4-60: DSC-Signale der Biopolymere bei einer Aufheizrate von 20 K/min (Gerät: Netzsch STA 409 C, Endtemperatur: 1.300 °C, Körnung: Pulver)

Abbildung 4-61 zeigt zusammenfassend die mittels DSC ermittelten Reaktionsenthalpien für die Biomassen und die Biopolymere. Cellulose, Zellstoff, Xylan und die beiden untersuchten Lignine zeigen dabei die höchsten Reaktionsenthalpien, da ihre Struktur verglichen mit der Biomasse weniger komplex ist. Anhand des Verhaltens der Biopolymere und der Stoffgruppenzusammensetzung lassen sich Rückschlüsse auf die Reaktionsenthalpien der Biomassen ziehen. Die Hölzer weisen bei der Pyrolyse ausschließlich endotherme Wärmetönungen (44 bis 82 kJ/kg) auf, was auf die hohen Cellulosegehalte (um 43 Ma.-%) zurückzuführen ist. Halmgüter und Silagen (Ausnahme: Maissilage) zeigen hingegen exotherme Wärmetönungen im Bereich bis -83 kJ/kg, wobei die Silagen und sonstigen Halmgüter im Bereich bis -35 kJ/kg liegen und nur die beiden pelletierten Weizenstrohproben mit den hohen Kaliumanteilen sehr hohe Werte (-74 bzw. -83 kJ/kg) aufweisen. Die Unterschiede in den Stoffgruppenzusammensetzungen verglichen mit den Hölzern ergeben sich aus dem höheren Gehalt an Hemicellulose in den Halmgütern und Silagen – daher dominieren die exothermen Reaktionen. Weiterhin sind Elemente wie Kalium in der Lage, bestimmte Reaktionensmechanismen zu begünstigen. So wird diesem Element eine fördernde Wirkung auf die exotherm ablaufenden primären Koksbildungsreaktionen nachgesagt /Raveendran1995/. Dies würde beispielsweise den Unterschied in der Reaktionsenthalpie zwischen gelbem (hoher

Kaliumgehalt) und grauem (niedriger Kaliumgehalt durch Demineralisierung) Weizenstroh erklären.

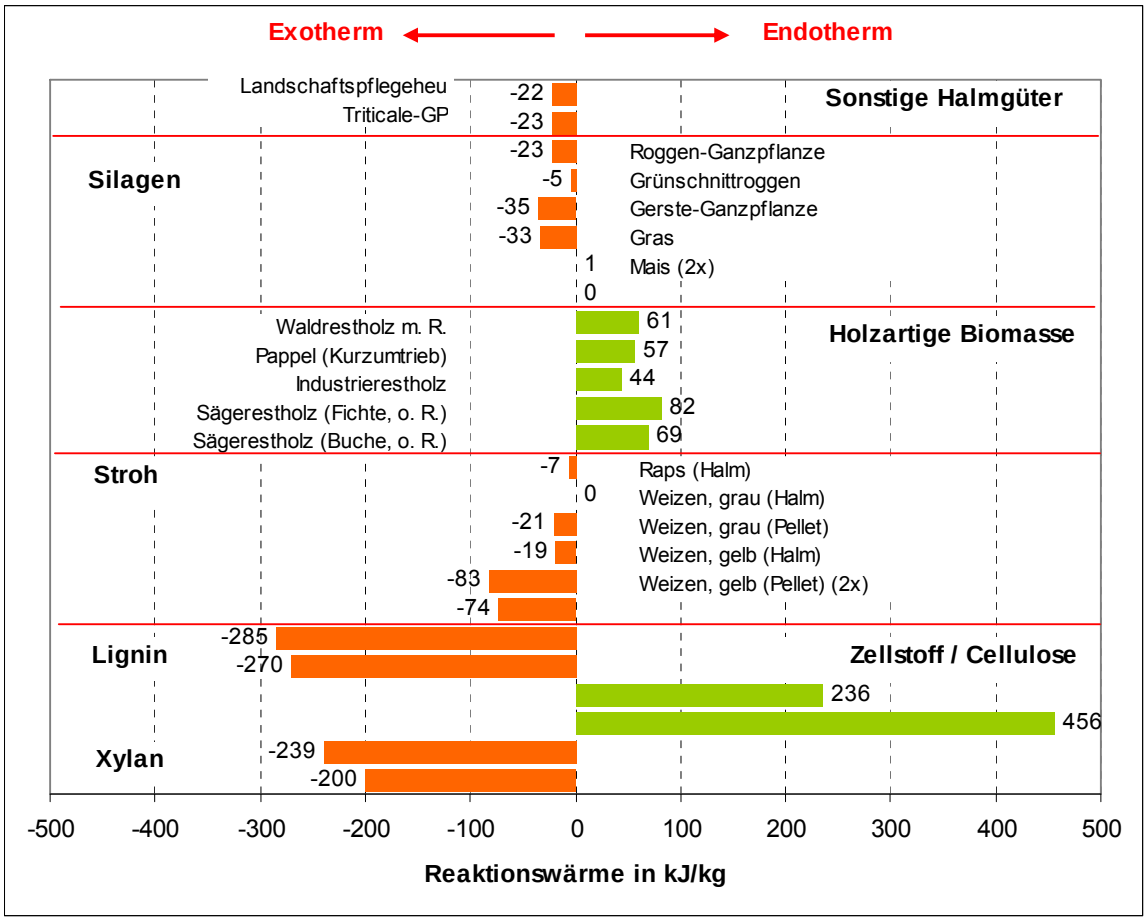


Abbildung 4-61: Mittels Differential-Scanning-Kalorimetrie bestimmte „Reaktionsenthalpien der Pyrolyse“ verschiedener Biomassen

Eine zusammenfassende Darstellung zu den ermittelten Reaktionsenthalpien sowie den Peak und Onsettemperaturen findet sich in Anhang K (Tab Anhang K-1).

Die mittels DSC erhaltenen Ergebnisse zur Reaktionsenthalpie von verschiedenen Biomassen und den Biopolymeren geben Trends an und erlauben Rückschlüsse auf die ablaufenden (dominierenden) Reaktionsmechanismen. In den absoluten Werten sind die Daten jedoch nur für die untersuchten Bedingungen belastbar, da die Prozessbedingungen wie Aufheizrate oder Druck und die rohstofflichen Einflussgrößen (Partikelgröße, Wassergehalt, Aschegehalt und -zusammensetzung) einen erheblichen Einfluss auf die ablaufenden Reaktionsmechanismen und somit die erhaltenen Reaktionsenthalpien haben.

4.3.3 Thermogravimetrie – Einfluss von Druck und Aufheizgeschwindigkeit

Die Untersuchungen mittels Thermogravimetrie liefern Masseverlustkurven sowie Reaktionsraten (Massenänderungsgeschwindigkeit) über die Temperatur und geben somit Aufschluss über die Zersetzungsbereiche der verschiedenen Biomassen in Abhängigkeit von den Prozessparametern Aufheizgeschwindigkeit und Druck.

Einfluss der Aufheizgeschwindigkeit

Langsame Aufheizraten haben zur Folge, dass sich die Schüttung an Einsatzmaterial relativ gleichmäßig erwärmt und somit eine gute Wärmeverteilung vorliegt. Die pyrolytische Zersetzung erfolgt allmählich, daher ergibt sich die geringste Reaktionsrate (s. Abbildung 4-62). Die im Partikelinneren entbundenen flüchtigen Bestandteile haben längere Verweilzeiten in der Schüttung, da der Gasdruck im Partikel aufgrund der langsamen Reaktionsraten eher gering ist. Aus diesem Grund werden sekundäre Pyrolysereaktionen begünstigt, die eine höhere Koksausbeute ergeben (29,7 → 27,3 → 24,4 Ma.-% wf bei 1.000 °C).

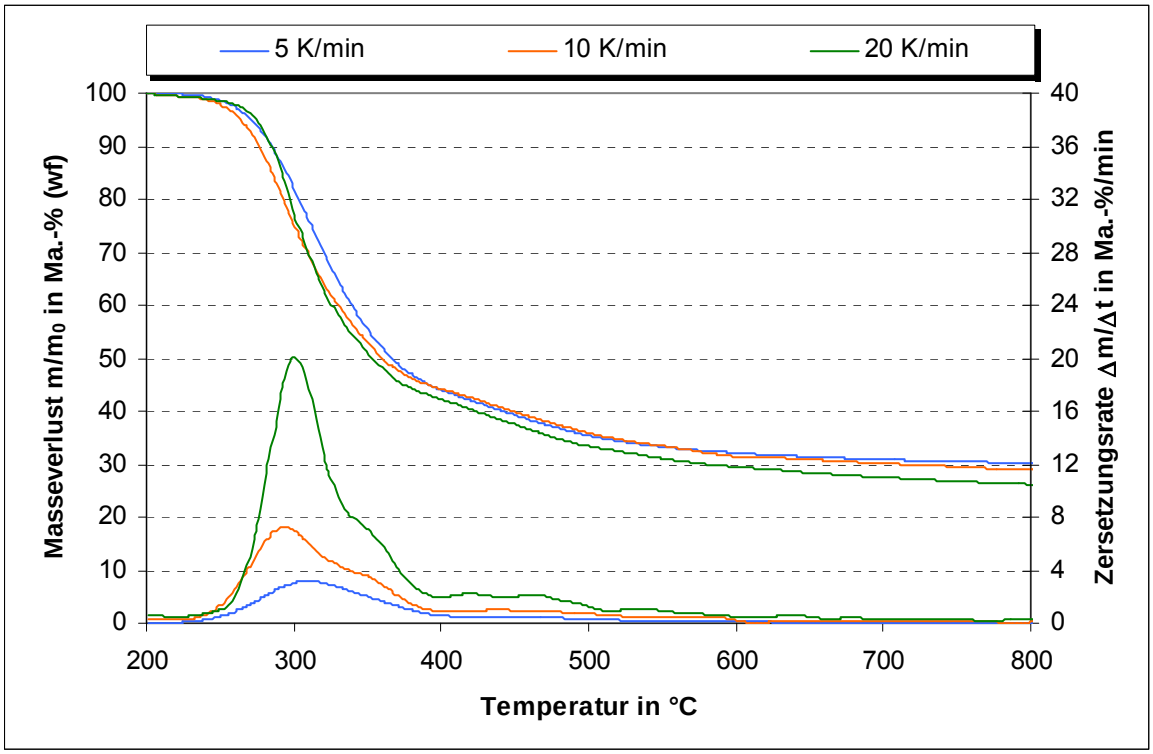


Abbildung 4-62: Ergebnisse der thermogravimetichen Untersuchungen zum Einfluss der Aufheizgeschwindigkeit auf die Pyrolyse von Maissilage (2475) (10 bar, Stickstoffatmosphäre, < 2 mm; Gerät: HP-TGA DMT)

Eine Steigerung der Aufheizgeschwindigkeit führt zu einem steileren Abfall in der Hauptzersetzungsphase (bis 400 °C), also zu höheren Reaktionsraten (s. Abbildung 4-62). Dabei ist ersichtlich, dass der Peak für die Reaktionsrate zunehmend in 2 Peaks (bzw. 1 Peak mit einer Schulter) aufgetrennt wird. Dieser Effekt resultiert bei der Maissilage aus der Trennung der Zersetzungsphasen von Hemicellulose (Maximum um 300 °C) und Cellulose (Schulter bei ca. 360 °C). Durch die wesentlich höheren Zersetzungsraten (3,2 → 7,2 → 20,1 Ma.-%/min) nimmt die Verweilzeit der flüchtigen in der Partikelschüttung ab und Sekundärreaktionen werden minimiert – die Ausbeute an Flüchtigen steigt.

Die Abbildungen zum Einfluss der Aufheizgeschwindigkeit auf die Pyrolyse von Maissilage bei einem und 30 bar befinden sich in Anhang K (Abb Anhang K-3 und Abb Anhang K-4).

Einfluss des Drucks

Den Einfluss des Drucks auf die Pyrolyse zeigt Abbildung 4-63 am Beispiel von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276). Die pyrolytische Zersetzung lässt sich für das Holz in zwei Phasen einteilen: (1) Hauptphase der Zersetzung (Celluloseabbau dominierend) und (2) zweite Phase der Zersetzung (Ligninabbau dominierend). Eine Steigerung des Drucks bewirkt insbesondere in der Hauptphase der Zersetzung eine Verschiebung zu höheren Temperaturen (371 → 378 → 414 °C). Der Effekt ist jedoch zwischen 1 und 10 bar geringer ausgeprägt als zwischen 10 und 30 bar. Womöglich würde sich hier ein linearer Zusammenhang zwischen der Druckerhöhung und der Verschiebung der Zersetzung zu höheren Temperaturen ergeben.

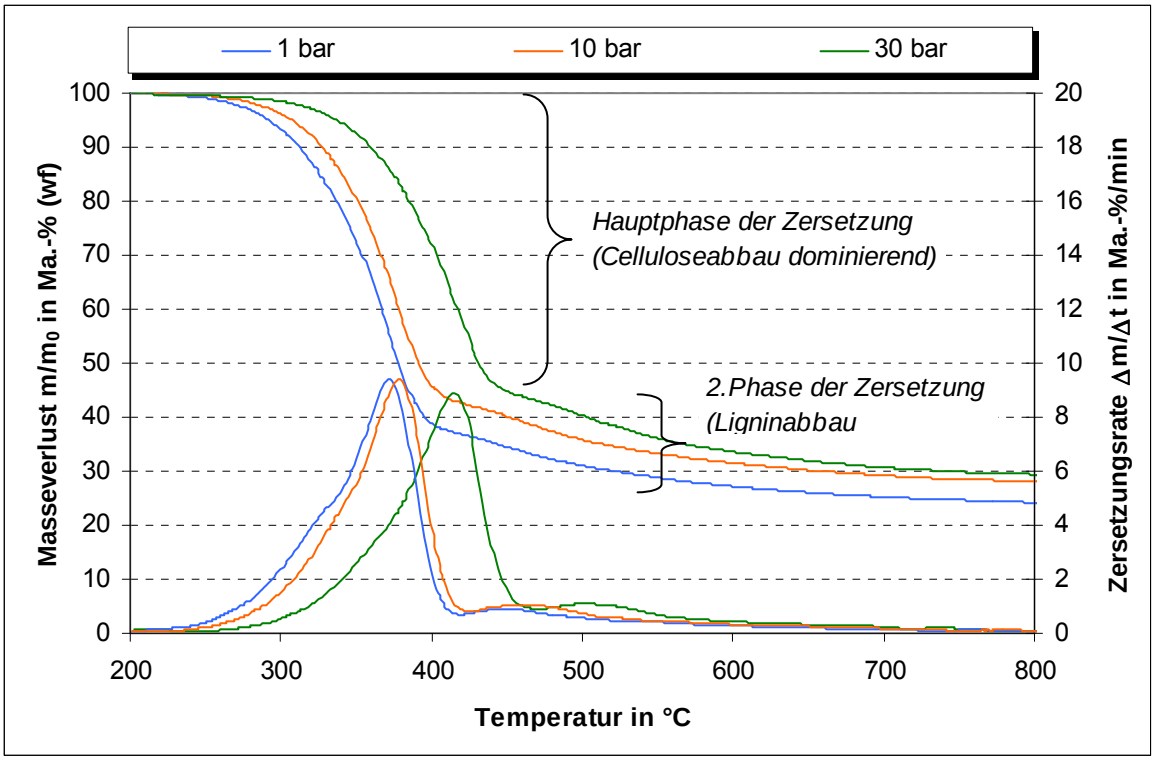


Abbildung 4-63: Ergebnisse der thermogravimetrischen Untersuchungen zum Druckeinfluss auf die Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte, rindenfrei) (10 K/min, Stickstoffatmosphäre, < 2 mm; Gerät: HP-TGA DMT)

Der Gehalt an entbundenen flüchtigen Komponenten nimmt mit steigendem Druck von ca. 62 Ma.-% wf (1 bar) auf 53 Ma.-% wf (30 bar) ab (Hauptphase). Dafür gibt es zwei mögliche Ursachen: Zum einen begünstigt die Druckerhöhung sekundäre Pyrolysereaktionen, da die Diffusion der im Partikel entbundenen gasförmigen Bestandteile durch den von außen wirkenden Gasdruck behindert wird und somit die Verweilzeit im Korn steigt. Zum anderen ist auch eine direkte Beeinflussung von primären Reaktionsmechanismen (Begünstigung oder Hemmung bestimmter Reaktionen) denkbar. Auf die maximale Zersetzungsrate bei der Pyrolyse zeigt der steigende Druck kaum einen Einfluss (9,4 → 9,4 → 8,9 Ma.-% wf/min).

Die Masseabnahme in der zweiten Phase der Zersetzung unterscheidet sich in Abhängigkeit vom Druck nur wenig (1, 10, 30 bar: 14 → 16 → 18 Ma.-% wf), sie ist allerdings ebenfalls zu höheren Temperaturen (Unterschiede ähnlich Hauptphase) verschoben. Druckveränderungen scheinen den Ligninabbau somit nur unwesentlich zu beeinflussen.

Für den gesamten Reaktionsverlauf der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) ergeben sich mit steigendem Druck höhere Ausbeuten an Koks (24,2 → 28,1 → 29,4 Ma.-% wf).

Während sich bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei) nur 1 Peak bei der Massenänderungsgeschwindigkeit ausbildet, zeigt sich bei der pyrolytischen Zersetzung von Pappel (Kurzumtrieb) zusätzlich noch eine deutlich ausgeprägte Schulter im Bereich um 300 °C (s. Abbildung 4-64). In der Masseverlustkurve (Abbildung 4-64) lassen sich daher drei Phasen der Zersetzung erkennen: (1) erste Phase (Hemicelluloseabbau dominierend), (2) zweite Phase bzw. Hauptphase (Celluloseabbau dominierend) und (3) dritte Phase (Ligninabbau dominierend).

Der gleiche Effekt konnte auch für die Pyrolyse von Sägerestholz (Buche, rindenfrei) bestätigt werden (s. Anhang K Abb Anhang K-5), während das untersuchte Waldrestholz (Fichte mit Rinde) die Schulter für die Hemicellulose nicht zeigte (s. Anhang K Abb Anhang K-6).

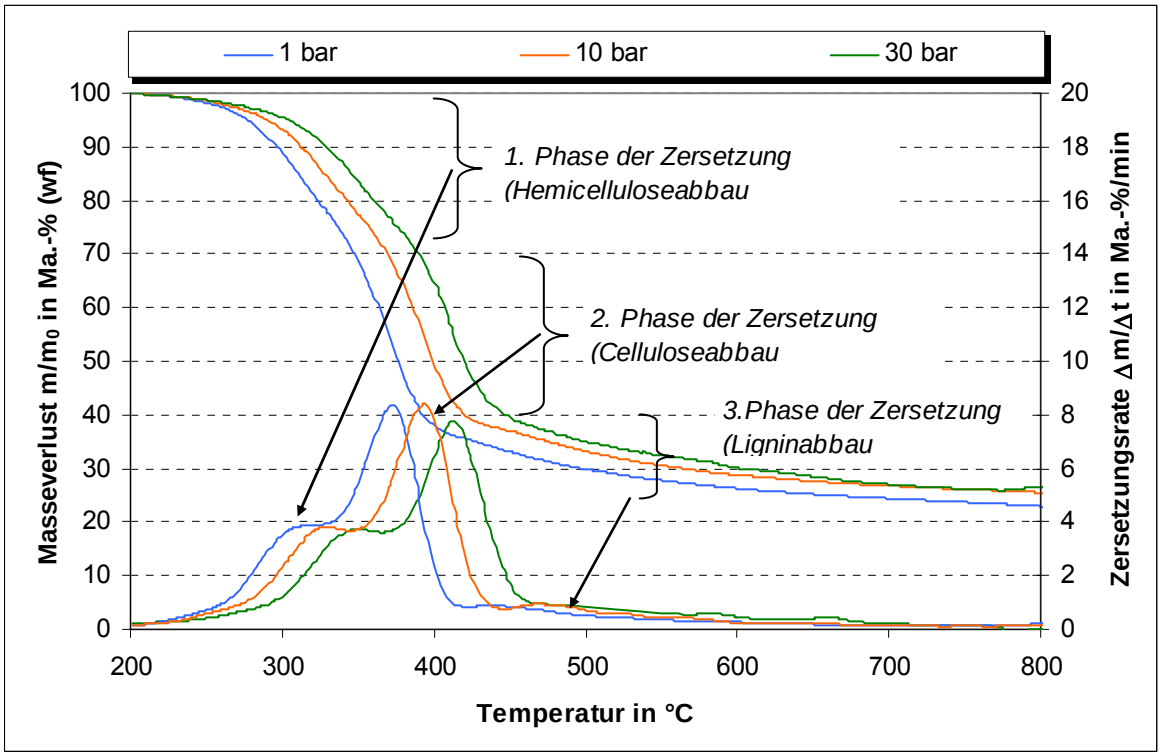


Abbildung 4-64: Ergebnisse der thermogravimetrischen Untersuchungen zum Druckeinfluss auf die Pyrolyse von Pappel (Kurzumtrieb) (10 K/min, Stickstoffatmosphäre, < 2 mm; Gerät: HP-TGA DMT)

Die Unterschiede resultieren aus der Stoffgruppenzusammensetzung der jeweiligen Biomasse. Pappel enthält als Vertreter der Laubhölzer einen höheren Anteil an Hemicellulose (ca. 28 ggü. 21 Ma.-%) und einen geringeren Anteil an Lignin (ca. 22 ggü. 28 Ma.-%) gegenüber dem zur Gruppe der Nadelhölzer gehörenden Sägerestholz (Fichte, rindenfrei).

Die Effekte hinsichtlich des Druckeinflusses sind für alle untersuchten Hölzer im Wesentlichen gleich. Bei der Pyrolyse von Pappel (Kurzumtrieb) ergibt sich mit einer Druckerhöhung in der 1. Phase der Zersetzung (Hemicelluloseabbau) lediglich eine Verschiebung zu höheren Temperaturen (310 → 330 → 350 °C). Eine Beeinflussung

des Flüchtigenumsatzes ist nicht erkennbar. Weiterhin liegt der Druckeinfluss bei der Zersetzung von Pappel auf die Verschiebung der Masseverlustkurven zu höheren Temperaturen zwischen 1 und 10 bar sowie zwischen 10 und 30 bar in etwa in der gleichen Größenordnung.

Bei Betrachtung des Pyrolyseverhaltens der Strohproben in Abhängigkeit vom Druck fallen verglichen mit den Hölzern einige Veränderungen auf, welche nachfolgend am Beispiel von Rapsstroh erläutert werden sollen (s. Abbildung 4-65). Zunächst ergeben sich ähnlich den Laubhölzern 3 Phasen der Zersetzung. In der 1. und 2. Phase kommt es dabei mit einer Drucksteigerung wieder zur Verschiebung zu höheren Temperaturen ($\Delta T \approx 25$ K). Die Erhöhung der Koksausbeute nach den ersten beiden Phasen der Zersetzung mit steigendem Druck ist hier kaum erkennbar. Daher ergeben sich nach Abschluss der pyrolytischen Zersetzung kaum Unterschiede auf die Ausbeute des zurückbleibenden Feststoffes (700 °C: 29,6 → 30,2 → 30,5 Ma.-% wf). Dies konnte ebenfalls für die Pyrolyse von Weizenstroh (2296 und 2297) sowie Roggenganzpflanzensilage (2473) festgestellt werden (s. Anhang K Abb Anhang K-7, Abb Anhang K-8 und Abb Anhang K-10).

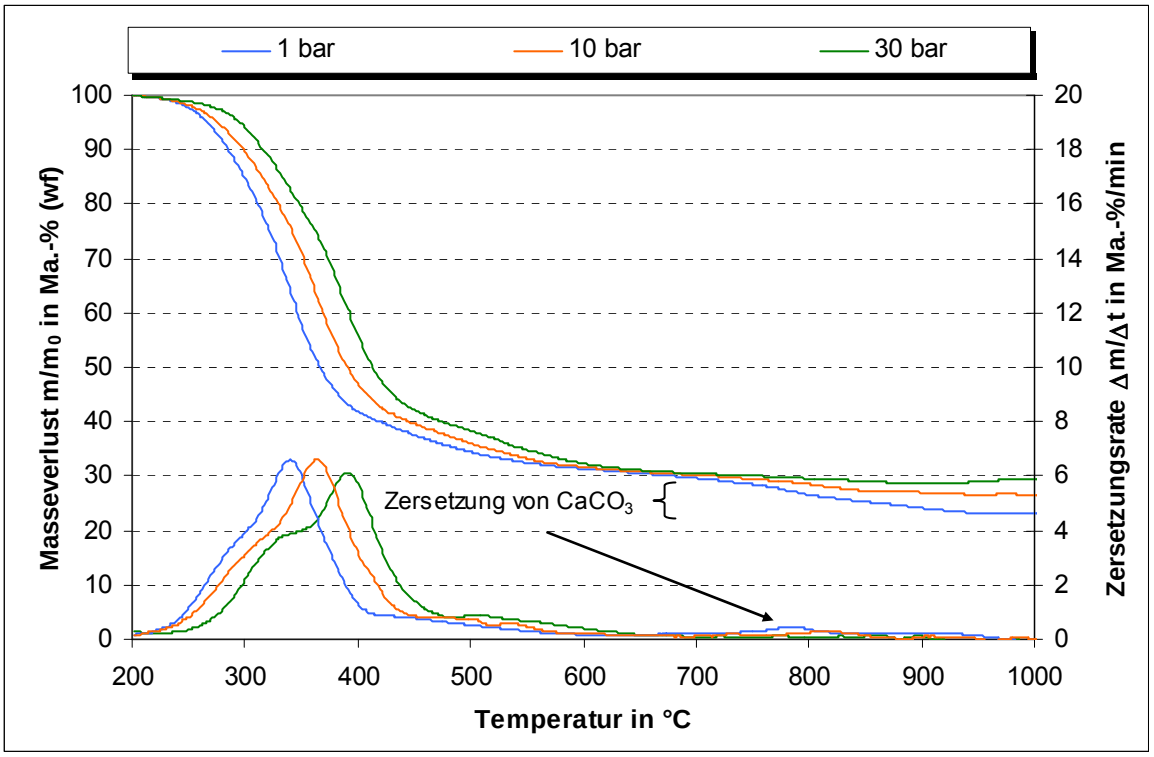


Abbildung 4-65: Ergebnisse der thermogravimetrischen Untersuchungen zum Druckeinfluss auf die Pyrolyse von Rapsstroh (10 K/min, Stickstoffatmosphäre, < 2 mm; Gerät: HP-TGA DMT)

Bei der Zersetzungsrate fällt auf, dass die Schulter, welche den Abbau der Hemicellulosen kennzeichnet mit steigendem Druck deutlicher ausgeprägt ist (insbesondere bei 30 bar).

Der Druckeinfluss bei der Pyrolyse verschiedener Strohsorten zeigt sich also lediglich in der Verschiebung der Zersetzung (Hemicellulose-, Celluloseabbau) zu höheren Temperaturen.

Bei Rapsstroh ergibt sich ab 750 °C noch eine Masseabnahme, die mit steigendem Druck geringer ausfällt. Diese ist auf die Carbonatzersetzung zurückzuführen. Die Asche des Rapsstrohs weist hohe Calcium und Kaliumanteile (ca. 40 Ma.-% wf), weiterhin konnten bei der Röntgenfluoreszenzanalyse hohe CO_2-Gehalte festgestellt werden, was darauf schließen lässt, dass Calcium und Kalium überwiegend als Carbonate in der Asche vorliegen. Calciumcarbonat zersetzt sich bei Temperaturen ab 700 °C nach folgender Reaktionsgleichung:

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2 \qquad (4\text{-}1)$$

Da die Reaktion unter Volumenzunahme abläuft (Bildung von CO_2), unterliegt sie mit steigendem Druck der Hemmung bzw. Verschiebung des Gleichgewichts auf die Eduktseite (Prinzip von Le Chatelier).

Massenverlustkurve und Zersetzungsrate für die Pyrolyse von Triticale-Ganzpflanze (2471) sind in Abbildung 4-66 dargestellt. Deutlich zeigt sich auch hier die Ausbildung der drei Zersetzungsphasen, wobei die Reaktionsrate in der ersten Phase (Hemicelluloseabbau) am höchsten ist.

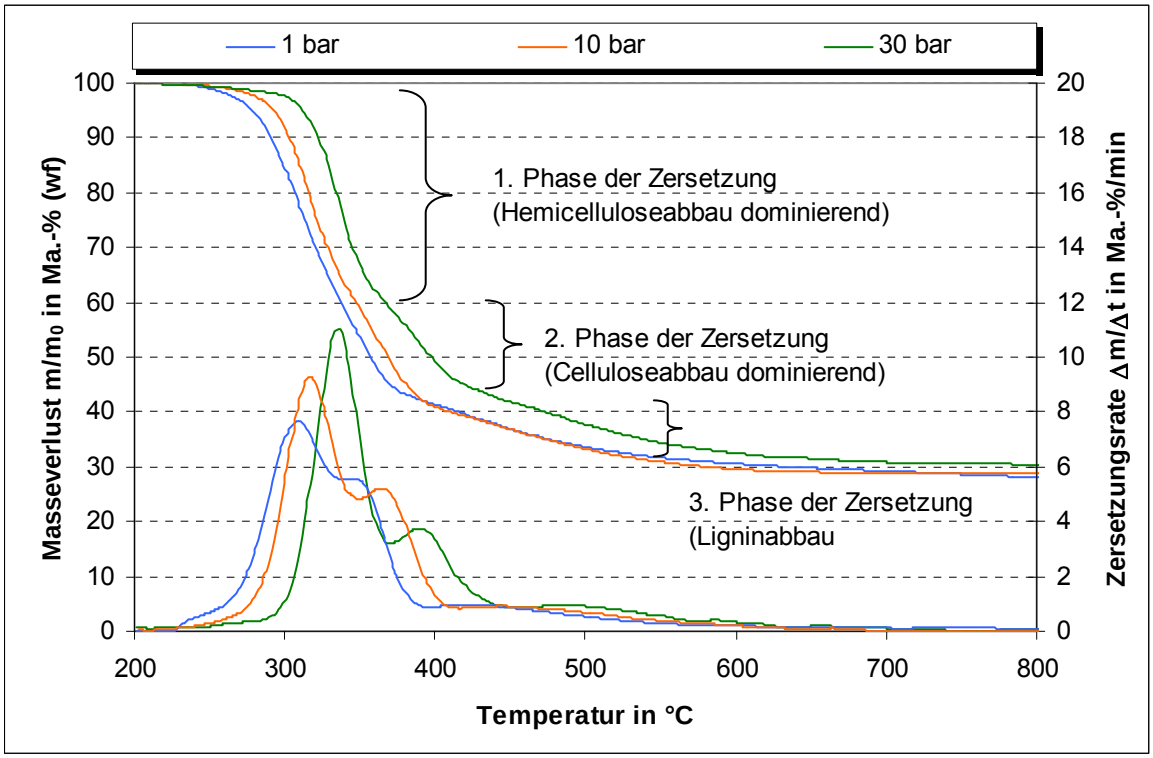


Abbildung 4-66: Ergebnisse der thermogravimetrischen Untersuchungen zum Druckeinfluss auf die Pyrolyse von Triticale-Ganzpflanze (10 K/min, Stickstoffatmosphäre, < 2 mm; Gerät: HP-TGA DMT)

Zusätzlich zur Verschiebung der Zersetzung zu höheren Temperaturen tritt bei Triticale-Ganzpflanze auch eine Steigerung der maximalen Reaktionsrate (Hemicelluloseabbau) mit zunehmendem Druck auf (7,7 → 9,3 → 11,0 Ma.-%/min), während die Zersetzungsrate in der 2. Phase (Celluloseabbau) abnimmt. Eine deutliche Erhöhung des Rückstandsgewichtes tritt nur bei 30 bar auf (28,1 → 28,7 → 30,4 Ma.-% wf).

Ein ähnliches Verhalten während der Pyrolyse zeigte auch die Maissilage (s. Anhang K Abb Anhang K-13). Daher ist zu vermuten, dass beide Rohstoffe eine ähnliche Stoff-

gruppenzusammensetzung mit einem hohen Anteil an Hemicellulosen (und möglicherweise Pektinen) aufweisen.

Abschließend ist festzuhalten, dass der Druckeinfluss im untersuchten Bereich den Effekt einer Veränderung der Aufheizrate deutlich übersteigt. Als wesentlichster Punkt zu den Auswirkungen einer Druckerhöhung bei der Biomassepyrolyse ist die Verschiebung der Zersetzung zu höheren Temperaturen zu nennen. Eine Steigerung der Koksausbeute konnte mit Ausnahme der Strohsorten und der Roggenganzpflanzensilage ebenfalls festgestellt werden. Dennoch ergeben sich insbesondere in Abhängigkeit der Stoffgruppenzusammensetzung der Biomassen teils unterschiedliche Effekte.

Bezüglich der Temperatur bei maximaler Zersetzungsrate lassen sich folgende Gruppen einteilen:

(1) Hölzer
(Cellulosegehalte um 43 Ma.-%):
370…420 °C Celluloseabbau dominierend

(2) Stroh, Roggenganzpflanzensilage
(hohe Cellulose- und Hemicellulosegehalte zwischen 60…80 Ma.-%):
325…392 °C Celluloseabbau dominierend

(3) Triticale-GP, Mais-, Grünschnittroggensilage:
(hohe Hemicellulosegehalte 40…45 Ma.-%):
293…335 °C Hemicelluloseabbau dominierend.

Die genauen Mechanismen gilt es in weiteren Untersuchungen aufzuklären.

4.4 Systematisierung der Bilanzergebnisse – Datenbank (AP IVa)

Zur Systematisierung der in den Pyrolyseversuchen erhaltenen Bilanzergebnisse und der Biomassezusammensetzung wurde mit Hilfe des Programms MS Access (Version 2007) eine Datenbank erstellt. Nachfolgend werden die Struktur der Datenbank erläutert sowie einige wichtige Hinweise zur Handhabung gegeben.

4.4.1 Struktur der Datenbank „Biomassepyrolyse“

Die erstellte Access-Datenbank besteht aus vier Tabellen (s. Abbildung 4-70, S. 140):

- 001_Rohstoff_Pyrolysebedingungen_Ausbeuten
- 002_Zusammensetzung der Pyrolyseprodukte
- 003_Pyrolysegaszusammensetzung
- 004_Elemente- und Energieverteilung,

in denen die einzelnen Spalten mit den jeweiligen Kenngrößen benannt sind. Für die Einträge in den einzelnen Spalten wurden vorher bestimmte Formate, wie z. B. Zeichenanzahl, Anzahl der Dezimalstellen oder nur Text festgelegt, so dass Falscheinträge z. B. bei der 4-stelligen Probenummer nicht möglich sind. Zur eindeutigen Identifizierung der Einträge wird vom Programm ein Primärschlüssel „ID“ als fortlaufende Nummer definiert. Auch nach Löschen eines Datensatzes wird dessen ID nicht erneut vergeben.

Zum Eintragen von Datensätzen existieren analog zu den Tabellenbezeichnungen vier Formulare, die in einem Gesamtformular zusammengefügt sind. Nach Öffnen des „Gesamtformulars“ zeigen sich vier Registerkarten (s. Abbildung 4-67), die den einzeln erstellten Formularen entsprechen.

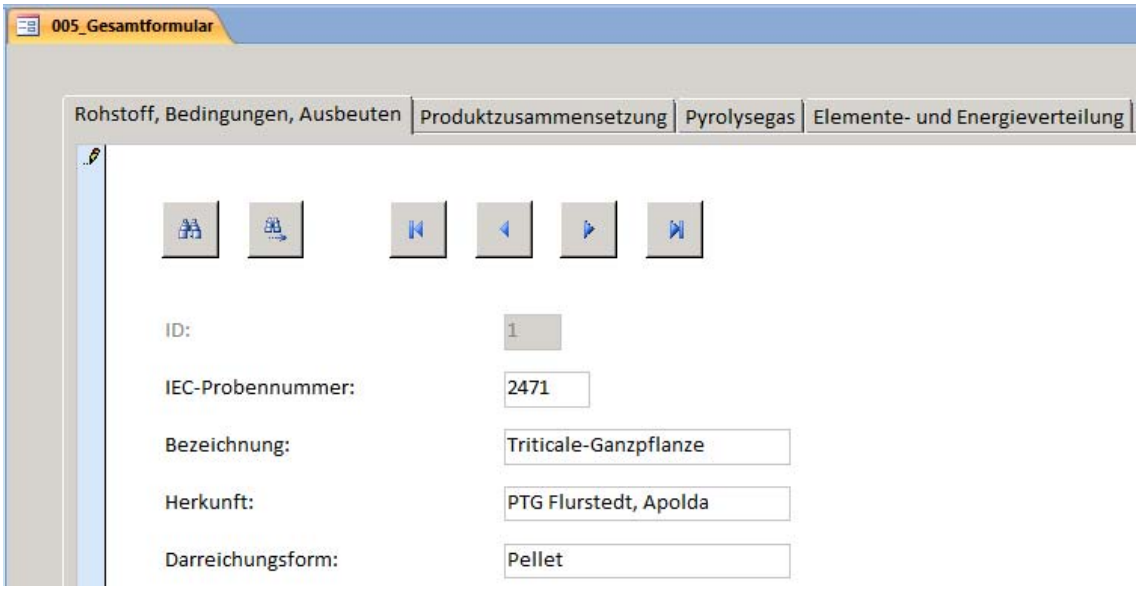


Abbildung 4-67: Ausschnitt aus dem Gesamtformular der Datenbank, Registerkarte „Rohstoff, Bedingungen, Ausbeuten“

Unter der Registerkarte *„Rohstoff, Bedingungen, Ausbeuten“* werden zunächst Angaben zur Rohstoffbezeichnung, Herkunft und Darreichungsform gemacht. Mit den Pfeilbuttons ist es möglich zwischen den einzelnen implementierten Datensätzen zu blät-

tern. Dieser Kopfteil findet sich auch in den anderen Formularen wieder. Die Eingabe erfolgt jedoch nur im Formular *„Rohstoff_Pyrolysebedingungen_Ausbeuten“*.

Im Formular *„Rohstoff_Pyrolysebedingungen_Ausbeuten“* finden sich außerdem Angaben zur Rohstoffzusammensetzung (Immediat-, Elementaranalyse), zum Energieinhalt und der Stoffgruppenzusammensetzung. Die Angabe erfolgt jeweils in Ma.-% bezogen auf den wasserfreien Zustand (s. Abbildung 4-68). Weiterhin sind die gewählten Pyrolysebedingungen mit Temperatur, mittlerer Aufheizrate, Haltezeit bei Endtemperatur, Körnung des Rohstoffes und ein mit Pulldown-Menü versehenes Feld für die Wahl des Reaktorprinzips angegeben. Auch die Werte für die Ausbeuten der Pyrolyseprodukte werden in diesem Formular visualisiert.

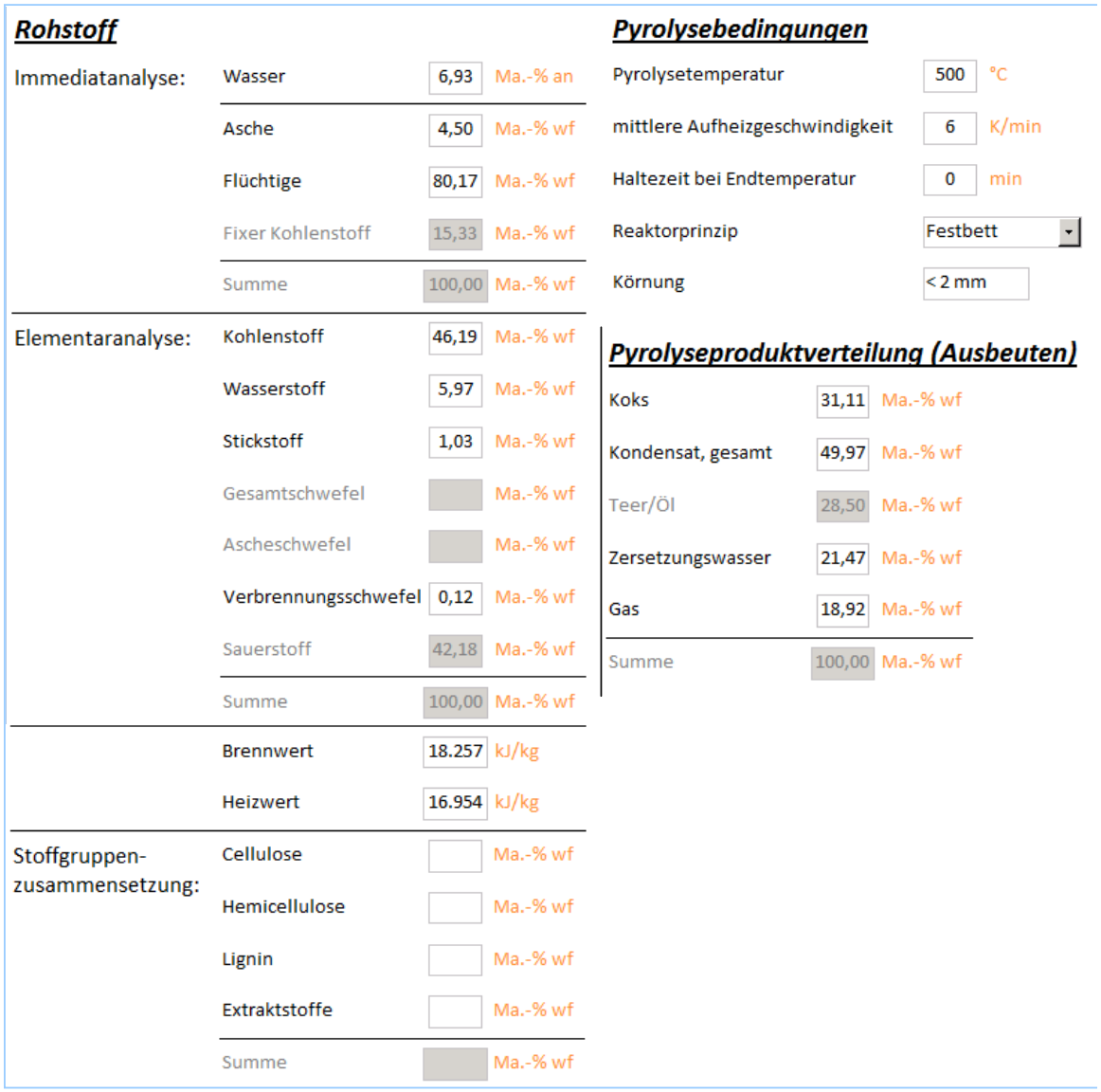
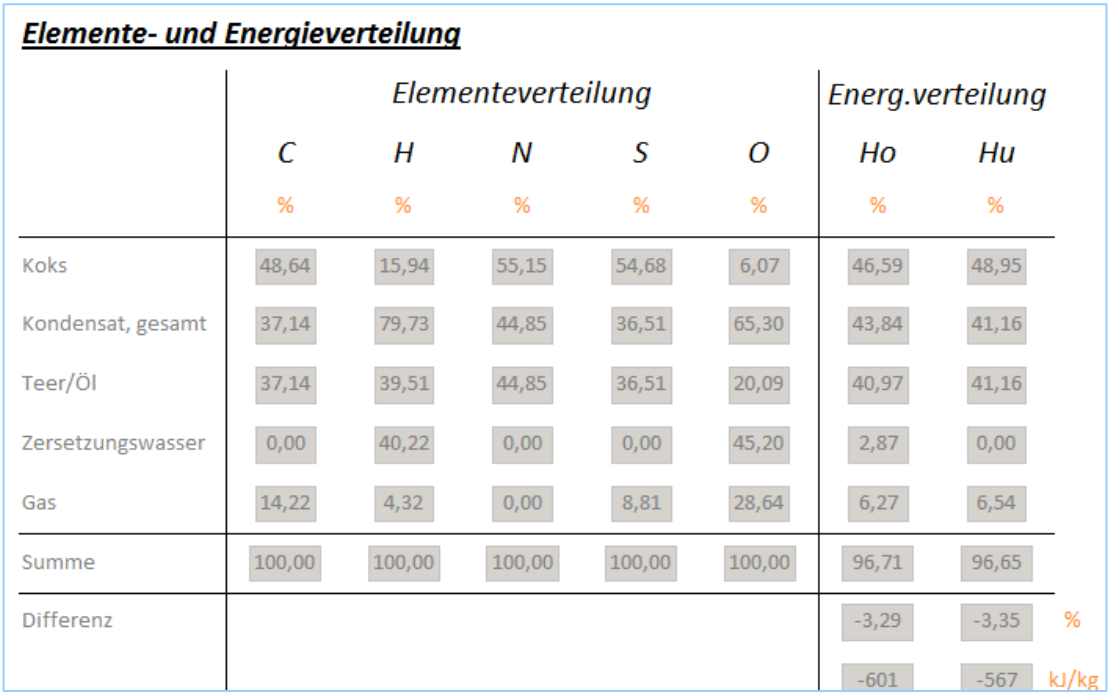


Abbildung 4-68: Ausschnitt der Benutzeroberfläche des Formulars „Rohstoff_Bedingungen_Ausbeuten“

Ansichten für die Formulare *„Produktzusammensetzung“* und *„Pyrolysegaszusammensetzung und –ausbeuten“* befinden sich in Anhang L.

Ist in einem Feld nichts implementiert, bedeutet dies, dass für den Eintrag aktuell keine Daten vorhanden sind. Einträge in die Datenbank sind nur in den weiß hinterlegten Feldern in den Formularen möglich. Die grau hinterlegten Felder ergeben sich aus im

Hintergrund laufenden Berechnungen. So sind beispielsweise im Formular „Elemente- und Energieverteilung“ alle Werte über Berechnungen hinterlegt (s. Abbildung 4-69).



Elemente- und Energieverteilung

	Elementeverteilung					Energ.verteilung		
	C	H	N	S	O	Ho	Hu	
	%	%	%	%	%	%	%	
Koks	48,64	15,94	55,15	54,68	6,07	46,59	48,95	
Kondensat, gesamt	37,14	79,73	44,85	36,51	65,30	43,84	41,16	
Teer/Öl	37,14	39,51	44,85	36,51	20,09	40,97	41,16	
Zersetzungswasser	0,00	40,22	0,00	0,00	45,20	2,87	0,00	
Gas	14,22	4,32	0,00	8,81	28,64	6,27	6,54	
Summe	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	96,71	96,65	
Differenz						-3,29	-3,35	%
						-601	-567	kJ/kg

Abbildung 4-69: Benutzeroberfläche des Formulars „Elemente- und Energieverteilung“

Für die Implementierung der Berechnungen wurde wie folgt vorgegangen: Sollen die Berechnungsergebnisse in den Formularen sichtbar gemacht werden, ist es notwendig die Gleichungen in der Formularentwurfsansicht in das jeweilige Feld zu integrieren. Dies erfolgt über die Feldeigenschaft *„Steuerelementeinhalt“*. Dies dient jedoch nur der Anzeige des Berechnungsergebnisses im Formular. Der Wert wird nicht in der zugehörigen Tabelle gespeichert. Zum Speichern der Berechnungsergebnisse in der jeweiligen Tabelle sind sogenannte Aktualisierungsabfragen notwendig (s. Abbildung 4-70, S. 140). Es wird zunächst eine neue Abfrage erstellt und dort das entsprechende Feld, die Tabelle und über einen Generator die Berechnungsgleichung eingegeben. Um bei Änderungen nicht jede Aktualisierungsabfrage einzeln abrufen zu müssen wurde ein Makro integriert (s. Abbildung 4-70, S. 140), dass alle Aktualisierungsabfragen durchführt.

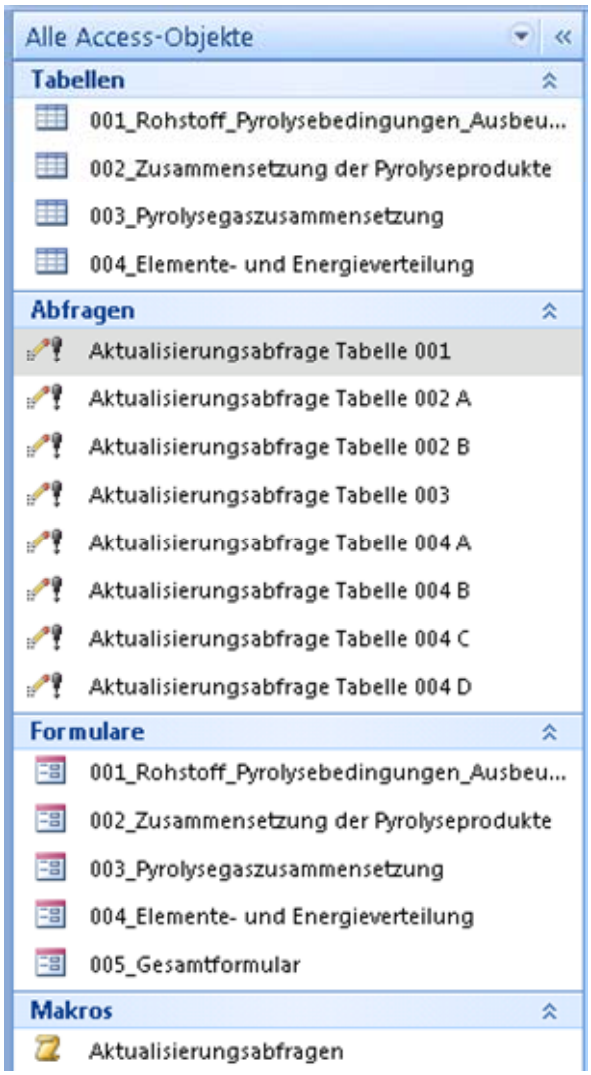


Abbildung 4-70: Menü der in die Datenbank „Biomassepyrolyse“ erstellten Access-Objekte

Die erstellte Datenbank enthält aktuelle 130 Datensätze zur Pyrolyse verschiedener Biomassen im Festbettreaktor unter Variation der Prozessparameter Temperatur und Aufheizgeschwindigkeit. Eine Erweiterung ist unproblematisch.

4.5 Modellierung des Pyrolyseprozesses mit AspenPlus™ (AP IVb)

Infolge der komplexen Natur ihrer Zersetzungsmechanismen wird die Pyrolyse von Biomasse durch eine Vielzahl verfahrenstechnischer und rohstofflicher Parameter beeinflusst. Eine Vorhersage von Pyrolyseproduktverteilungen und -zusammensetzungen ist mit Hilfe thermodynamischer Simulationssoftware derzeit nicht oder nur unzulänglich möglich. Grund dafür ist, dass infolge unzureichender Kenntnis der ablaufenden Reaktionsmechanismen und -kinetiken sowie softwarebedingter Restriktionen zum gegenwärtigen Zeitpunkt kein Modell existiert, bei dem der Pyrolyseprozess durch Einzelreaktionen zur Bildung der Produkte vollständig beschrieben werden kann. Aktuell ist also nur eine indirekte Modellierung bzw. Abbildung auf Basis experimenteller Daten möglich. Grundvoraussetzung für die Implementierung der Pyrolyse in Modelle zur thermochemischen Konversion von biogenen Festbrennstoffen sowie zur detaillierten stofflichen und energetischen Bilanzierung und Bewertung derartiger Prozesse sind daher konsistente Datensätze zu Pyrolyseproduktverteilungen, -zusammensetzungen und -energieinhalte. Weiterhin sind für eine vollständige Beschreibung der Energiebilanz des Pyrolyseprozesses und der Ermittlung des notwendigen Energiebedarfs stoffspezifische Kennwerte wie z. B. spezifische Wärmekapazitäten oder Verdampfungs-/Kondensationsenthalpien des Einsatzstoffes und der Pyrolyseprodukte erforderlich, die in der Literatur nur sehr eingeschränkt verfügbar sind.

Für die Modellierung der Biomassepyrolyse in Arbeitspaket IVb auf Basis der experimentell generierten Daten wurde die Software ASPENplus™ genutzt. Dabei handelt es sich um ein sequentiell modular arbeitendes Simulationsprogramm, welches einzelne verfahrenstechnische Grundoperationen (unit operations) entsprechend ihrer Reihenfolge im Prozess nacheinander berechnet. ASPENplus™ stellt eine Vielzahl von unit operations (z. B. Reaktoren, Wärmeübertrager, Pumpen/Verdichter, Misch- und Trennaggregate) zur Verfügung, die über Stoff- und Energieströme miteinander verknüpft werden. Eingangsströme werden durch Massen- oder Molanteile der enthaltenen Komponenten sowie Druck und Temperatur eindeutig definiert. Ausgangsströme einer unit operation dienen dabei als Eingangsströme einer nachfolgenden unit operation und zur Berechnung der resultierenden Ausgangsströme. Dafür kann auf eine umfangreiche Stoffdatenbank und verschiedene thermodynamische Modelle zurückgegriffen werden.

Zur Steuerung der Modellierung können FORTRAN-Blöcke, z. B. für die Berechnung von Inputvariablen, eingesetzt werden. Sogenannte design specs (Design-Spezifikationen) ermöglichen die Anpassung der Modellierung an gegebene Randbedingungen. Anhand der so gewonnenen Daten aus der Modellierung mittels ASPENplus™ lassen sich technische Systeme stofflich und energetisch bilanzieren.

Da die Anpassung eines Modells in der Software ASPENplus™ an viele Datensätze mit vielen Parametern sehr zeitaufwendig ist, wurde ein automatisches Datenübertragungswerkzeug erstellt. Ein Makro (VBA-Programm, Visual Basic for Applications) unter der Oberfläche der Tabellenkalkulationssoftware MS EXCEL sucht in der vorhandenen Datenmenge anhand der Auswahl der Ausgangsbiomasse und nach Eingabe der entsprechenden Prozessparameter (Pyrolyseendtemperatur oder Aufheizgeschwindigkeit) den jeweiligen Datensatz. Die für die Modellierung erforderlichen Daten werden über das Werkzeug ASPENWorkbook™ automatisiert an die Modellierungs-

software ASPENplus^{TM} übertragen. Nach der Berechnung werden die für die Erstellung der Energiebilanz erforderlichen Parameter an MS EXCEL zurückgegeben. Für die korrekte Funktion dieser Berechnungskette ist die Stabilität des ASPENplus^{TM}-Modells über weite Variationsbereiche der veränderlichen Parameter sicherzustellen.

Die Ergebnisse der thermodynamischen Modellierung wurden in MS EXCEL hinterlegt. Diese Daten können über ein weiteres Makro abgerufen werden und dienen der Ermittlung der Stoff- und Energiebilanzen für die Pyrolyse verschiedener Biomassen unter variablen Prozessbedingungen. Der Vorteil hierbei ist, dass für die Weiterarbeit mit den Modellierungsergebnissen keinerlei Kenntnisse für die Bedienung der Software ASPENplus^{TM} erforderlich sind. Außerdem ist die Tabellenkalkulationssoftware MS EXCEL im Vergleich zu ASPENplus^{TM} weit verbreitet und kostengünstiger. Die Bedienung des erstellten Auswertungs-Werkzeuges wird in Kapitel 4.5.4 ausführlich beschrieben.

4.5.1 Allgemeine Modellbeschreibung

Für die Modellierung wurde unabhängig von der Biomasseart eine Brennstoffwärmeleistung von 10 MW (th) angenommen. Die Gutfeuchte der Einsatzstoffe wurde auf 12 Ma.-% festgelegt, was einen typischen Wert für z. B. luftgetrocknetes Holz oder Stroh darstellt. Aus den ermittelten Daten können die Ergebnisse für andere Brennstoffwärmeleistungen mittels entsprechender Skalierungsfaktoren abgeleitet werden.

Ausgehend von den durchgeführten Pyrolyseuntersuchungen, der Charakterisierung der Einsatzstoffe und Pyrolyseprodukte sowie der Kenntnis der einzelnen Pyrolyseschritte (Trocknung und pyrolytische Zersetzung) wurde das in Abbildung 4-71 gezeigte Pyrolysemodell erstellt. Es handelt sich dabei um ein allgemeines, stationäres Modell.

Der Einsatzstoff wird auf die Trocknungstemperatur (hier: 150 °C) erwärmt und anschließend die Gutfeuchte abgetrennt (Trocknungsphase). Nach der Erwärmung auf die Pyrolyseendtemperatur (hier: 350 °C) werden durch die pyrolytische Zersetzung entsprechend der experimentell ermittelten Elementebilanzen die jeweiligen Stoffmengen für den Pyrolysekoks, das Pyrolysekondensat und -gas abgetrennt. Daraus werden anschließend die Pyrolyseprodukte gebildet und auf die festgelegte Umgebungstemperatur (hier: 25 °C) abgekühlt.

Auf Basis der experimentell bestimmten Stoff- und Energiebilanzen (nur chemisch gebundene Energien) für unterschiedliche Einsatzstoffe und Prozessparameter (Pyrolyseendtemperatur, Aufheizgeschwindigkeit) werden bei einer festgelegten Umgebungstemperatur von 25 °C und der Trocknungstemperatur von 150 °C durch die Software ASPENplus^{TM} die für die Aufstellung der Energiebilanz erforderlichen Wärmemengen ermittelt. Dies sind neben den experimentell und analytisch ermittelten chemisch gebundenen Energien (Enthalpien) des Einsatzstoffes und der Pyrolyseprodukte die erforderlichen Wärmemenge für die Aufheizung auf Trocknungstemperatur (Q1) sowie auf Pyrolyseendtemperatur (Q2 und Q3), die Wärmemengen für die Bildung der Pyrolyseprodukte aus den Einzelelementen (QGAS, QOEL, QZW und QKOKS) und die abzuführenden Wärmemengen bei der Rückkühlung der Pyrolyseprodukte auf die Umgebungstemperatur (K-GAS, K-OEL, K-ZW, K-KOKS und K-H2O).

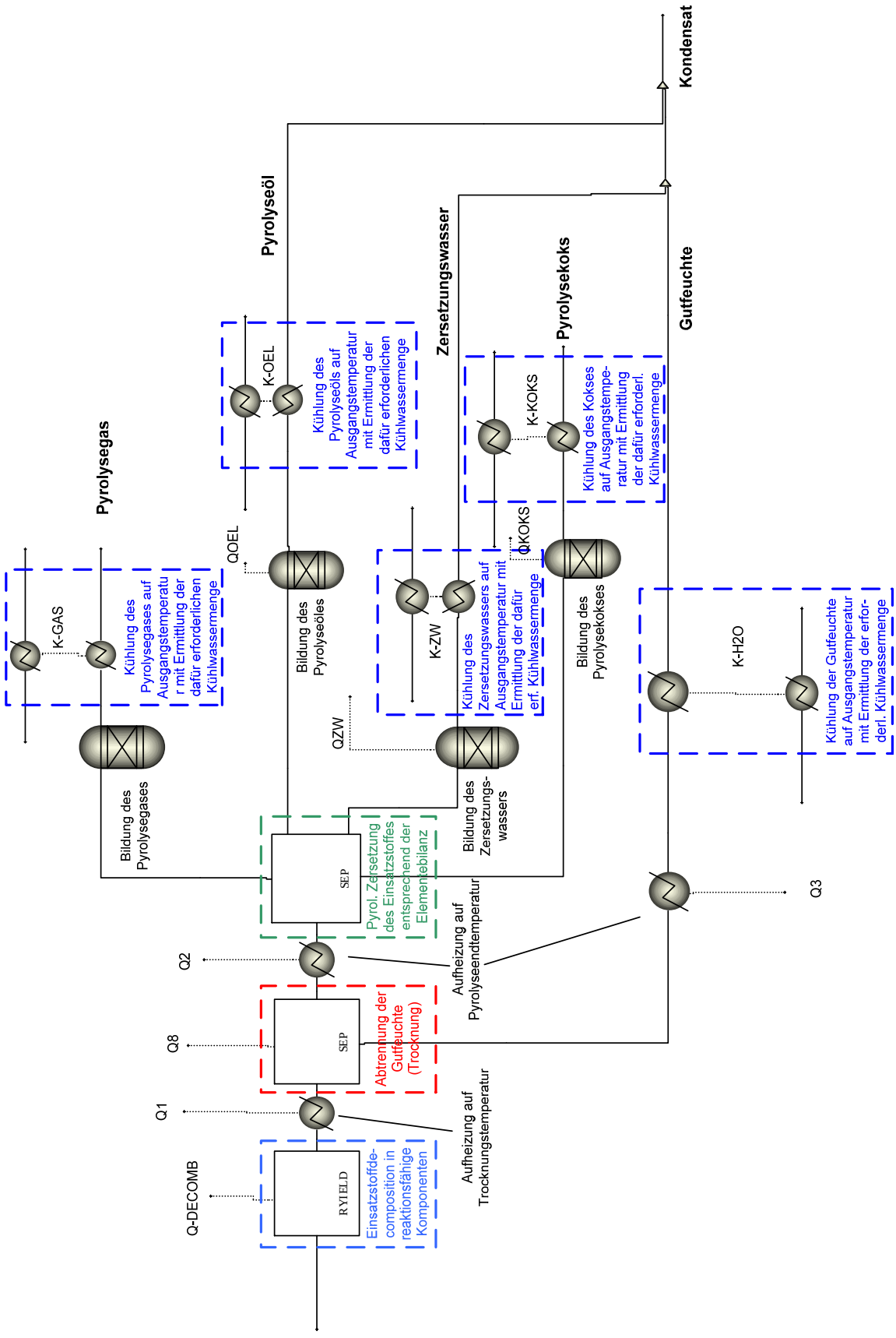


Abbildung 4-71: Schematische Darstellung des in ASPENplus™ erstellten Pyrolyse-modells

Das Produkt „Pyrolysegas“ ist der einzige Stoffstrom, dessen molekulare Zusammensetzung bekannt ist. Ziel der Modellerstellung ist es, einen Pyrolysegasstrom zu erzeugen, der in seiner Zusammensetzung der im Rahmen der experimentellen Untersuchungen ermittelten Zusammensetzung ähnelt, um vergleichbare Pyrolysegaseigenschaften (z. B. Heizwert, Dichte, spezifische Wärmekapazität) für die energetische Bilanzierung zu erhalten. Dies lässt sich erreichen, indem mögliche Reaktionsprodukte (vgl. Tabelle 4-10) und Gleichgewichtsreaktionen für deren Entstehung (vgl. Tabelle 4-11) vorgegeben werden.

Tabelle 4-10: Vorgabe der Reaktionsprodukte für die Pyrolysegasbildung

Reaktionsprodukt	Chemische Formel
Stickstoff	N_2
Sauerstoff	O_2
Kohlenstoff	C
Kohlenmonoxid	CO
Kohlendioxid	CO_2
Wasserstoff	H_2
Methan	CH_4
Ethan	C_2H_6
Ethen	C_2H_4
Propan	C_3H_8
Propen	C_3H_6
Propin	C_3H_4
Carbonylsulfid	COS
Schwefelwasserstoff	H_2S
i-Butan	$i\text{-}C_4H_{10}$
n-Butan	$n\text{-}C_4H_{10}$

Tabelle 4-11: Reaktionsgleichung der Gleichgewichtsreaktionen

Edukte				Produkte
2 C	+	2 H_2	↔	C_2H_4
2 C	+	3 H_2	↔	2 C_2H_6
3 C	+	2 H_2	↔	C_3H_4
C	+	2 H_2	↔	CH_4
C	+	0,5 O_2	↔	CO
C	+	O_2	↔	CO_2
3 C	+	3 H_2	↔	C_3H_6
3 C	+	4 H_2	↔	C_3H_8
4 C	+	5 H_2	↔	C_4H_{10}

Die temperaturabhängigen Gleichgewichtskonstanten der genannten neun Reaktionsgleichungen bestimmen das thermodynamische Gleichgewicht in der homogenen Gasphase. In Abhängigkeit von der eingestellten Pyrolyseendtemperatur ergibt sich also die Gleichgewichtszusammensetzung des Pyrolysegases. Auf Grund kinetischer Hemmungen kann sich eine abweichende Gaszusammensetzung entsprechend einer

bestimmten Gleichgewichtstemperatur einstellen, obwohl das Gas eine andere Temperatur aufweist. Durch entsprechende Reaktoreinstellungen der unit operation für die Bildung des Pyrolysegases bei der Modellierung kann die Pyrolysegaszusammensetzung des Modells den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen angeglichen werden.

4.5.2 Datenbasis und Vorgehensweise bei der Modellierung

Für die Berechnung der Energiebilanz sind folgende Inputdaten erforderlich:

- Wassergehalt, Heizwert, Immediat- und Elementaranalyse der Ausgangsbiomasse,
- Pyrolyseproduktverteilung,
- Heizwert, Immediat- und Elementaranalyse des Pyrolysekokses,
- Heizwert, Immediat- und Elementaranalyse des Pyrolyseöles sowie
- Heizwert und molekulare Zusammensetzung des Pyrolysegases.

Diese umfangreichen Daten müssen für jeden Versuchspunkt (eindeutig definiert durch die Art Biomasse, die Pyrolyseendtemperatur bzw. die Aufheizgeschwindigkeit) vollständig vorhanden sein, um die geschlossene Energiebilanz ermitteln zu können. Dafür wurden umfangreiche experimentelle Pyrolyseuntersuchungen mit anschließender Analyse der Produkte durchgeführt, um für jeden Versuchspunkt geschlossene Stoffbilanzen aufstellen zu können, die die Basis für die thermodynamische Modellierung bilden.

Für 17 verschiedene Ausgangsbiomassen (Holz, Halmgut, Silagen) und Biomassebestandteile (Xylan, Lignin, Zellstoff) wurden in insgesamt 99 Versuchspunkten für variierende Pyrolyseendtemperaturen (vgl. Tabelle 4-12) die Stoffbilanzen erstellt.

Tabelle 4-12: In das Pyrolysemodell implementierte Versuchspunkte für die Variation der Pyrolysetemperatur bei Schnellaufheizung

Proben-Nr.	Ausgangsbiomasse	T_{unten}	T_{oben}	Versuchsanzahl
1234	Xylan	265	703	3
2275	Weizenstroh	284	750	11
2276	Sägerestholz (Fichte, rindenfrei)	308	750	13
2297	Weizenstroh, grau	340	705	5
2309	Sägerestholz (Buche, rindenfrei)	349	698	5
2386	Rapsstroh	333	707	5
2469	Pappel (Kurzumtrieb)	320	702	5
2471	Triticale-Ganzpflanze	307	705	6
2472	Waldrestholz (Fichte mit Rinde)	258	702	8
2473	Roggen-Ganzpflanzen-Silage	303	700	5
2474	Grünschnittroggensilage	302	703	6
2475	Maissilage	246	698	8
2480	Landschaftspflegeheu	303	700	5
2621	Fichte-Sulfit-Zellstoff	342	702	5
2623	Lignin, alkali	403	702	3
2664	Xylan (Birkenholz)	374	701	3
2665	Lignin, alkali	429	707	3
Summe				99

Die vierstellige Probennummer garantiert die eindeutige Zuordnung, z. B. bei ähnlichen Bezeichnungen für die Ausgangsbiomassen (Xylan und Xylan, Birkenholz). Die untere und die obere Pyrolyseendtemperatur (T_{unten} und T_{oben}) kennzeichnen den Temperaturbereich, in dem die unter „Versuchsanzahl“ angegebene Menge von Pyrolyseversuchen durchgeführt wurde.

Für fünf verschiedene Biomassen wurde für eine bzw. in zwei Fällen für zwei Pyrolyseendtemperaturen die Aufheizgeschwindigkeit variiert (vgl. Tabelle 4-13). In Summe ergeben sich 30 Versuchspunkte für die Aufheizgeschwindigkeit.

Tabelle 4-13: In das Pyrolysemodell implementierte Versuchspunkte für die Variation der Aufheizrate bei Pyrolysetemperaturen von 400 bzw. 500 °C

Proben-Nr.	Ausgangsbiomasse	T_{unten}	T_{oben}	AHG_{unten}	AHG_{oben}	Versuchsanzahl
2275	Weizenstroh	400	500	6	84	9
2276	Sägerestholz (Fichte, rindenfrei)		500	5	83	5
2471	Triticale-Ganzpflanze		500	6	77	4
2472	Waldrestholz (Fichte mit Rinde)	400	500	6	72	8
2475	Maissilage		500	6	70	4
Summe						30

Auch in Tabelle 4-13 kennzeichnen die untere und die obere Aufheizgeschwindigkeit (AHG_{unten} und AHG_{oben}) das Intervall, in dem die angegebene Anzahl an Versuchen durchgeführt wurde.

Insgesamt wurden Daten für 129 Versuchspunkte als Basis für die Modellierung mit ASPENplus™ hinterlegt.

4.5.3 Ergebnisse der Pyrolysemodellierung

Das Ergebnis der thermodynamischen Berechnungen ist für jeden Versuchspunkt die jeweilige Energiebilanz, in der die erforderlichen Energieströme berücksichtigt sind. Die für die Pyrolyse aufgebrachten oder dabei freiwerdenden Wärmemengen können wie folgt beschrieben werden:

- Bezeichnung der Ausgangsbiomasse: Chemische Enthalpie der Ausgangsbiomasse
- Pyrolysekoks: Chemische Enthalpie des Pyrolysekokses
- Pyrolysegas: Chemische Enthalpie des Pyrolysegases
- Pyrolyseöl/-teer: Chemische Enthalpie des Pyrolyseöles
- Zersetzungswasser: Chemische Enthalpie des Zersetzungswassers (immer „Null“)
- Gutfeuchte: Chemische Enthalpie der Gutfeuchte (immer „Null“)
- Q-DECOMP: Zersetzen der Ausgangsbiomasse in reaktionsfähige Komponenten
- Q1: Erwärmen der Ausgangsbiomasse auf Trocknungstemperatur
- Q2: Aufheizen auf Pyrolyseendtemperatur (ohne Gutfeuchte)

- Q3: Aufheizen auf Pyrolyseendtemperatur (Gutfeuchte)
- QGAS: Enthalpie zur Erzeugung des Pyrolysegases
- QOEL: Enthalpie zur Erzeugung des Pyrolyseöls
- QZW: Enthalpie zur Erzeugung des Zersetzungswassers
- QKOKS: Enthalpie zur Erzeugung des Pyrolysekokses
- K-Gas: Kühlen des Pyrolysegases auf Umgebungstemperatur (hier: 25 °C)
- K-Oel: Kühlen des Pyrolyseöles auf Umgebungstemperatur (hier: 25 °C)
- K-ZW: Kühlen des Zersetzungswassers auf Umgebungstemperatur (hier: 25 °C)
- K-Koks: Kühlen des Pyrolysekokses auf Umgebungstemperatur (hier: 25 °C)
- K-H2O: Kühlen der Gutfeuchte auf Umgebungstemperatur (hier: 25 °C)

Die Summe der Wärmeströme Q1, Q2 und Q3 stellt die zur Beheizung des Pyrolyseprozesses benötigte Wärmemenge dar und die Wärmeströme K-Gas, K-Oel, K-ZW, K-Koks und K-H2O den Anteil der fühlbaren Wärme der Produktströme. Diese sieben Wärmeströme werden zusammen mit den experimentell ermittelten Heizwertbilanzen zur energetischen Bilanzierung des Prozesses verwendet.

In Abbildung 4-72 ist exemplarisch die Energiebilanz für die Pyrolyse von Triticale-Ganzpflanze (2471) bei einer Temperatur von 600 °C und Schnellaufheizung darge-

input	**MW**	**output**	**MW**
Triticale-Ganzpflanze	10,0000	Pyrolysekoks	4,4701
		Pyrolysegas	0,5062
		Pyrolyseöl/-teer	5,0812
		Zersetzungswasser	0,0000
		Gutfeuchte	0,0000
Q-DECOMB	3,1692	K-Gas	0,0156
Q1	0,3278	K-Oel	0,0763
Q2	0,4253	K-ZW	0,2170
Q3	0,0562	K-Koks	0,3215
		K-H2O	0,2721
		QGAS	0,0956
		QOEL	0,8564
		QZW	0,8327
		QKOKS	0,3146
Fehler (absolut)	-0,9192		
Fehler (relativ)	-7,04%		
	13,0594		**13,0594**

stellt.

Abbildung 4-72: Output der Modellierung für die Pyrolyse von Triticale-Ganzpflanze bei 600 °C und Schnellaufheizung

Die gelb hinterlegten Werte für die entsprechende Wärmemenge sind dabei das Resultat der thermodynamischen Modellierung mittels ASPENplus^{TM}, während die nicht hinterlegten Wärmemengen das Resultat der experimentellen Untersuchungen sind.

Neben den Werten für die Bilanzsumme, dem absoluten und dem relativen Fehler (hier: Differenz zwischen den austretenden Energieströmen und der Brennstoffwärmeleistung) können anhand der thermodynamischen Modellierung außerdem der Pyrolysewärmebedarf sowie der erforderliche Anteil an Pyrolysekoks bzw. –öl für die Bereitstellung der Pyrolysewärme ermittelt werden.

4.5.4 Vorgehensweise bei der Auswertung der Ergebnisse

Die Abfrage der experimentell und durch die thermodynamische Modellierung ermittelten Stoff- und Energiebilanzen erfolgt über ein unter der Benutzeroberfläche von MS EXCEL erstelltes Makro (VBA-Programm). Hierfür wurde besonders auf allgemeinverständliche Termini und Benutzerfreundlichkeit Wert gelegt.

Es wurden 129 Datensätze (s. Tabelle 4-12, Tabelle 4-13) in einer MS EXCEL-Arbeitsmappe hinterlegt. Auswahlkriterien für die Datensätze sind die Art der eingesetzten Biomasse und der jeweilige Wert der Pyrolyseendtemperatur bzw. der Aufheizgeschwindigkeit. Exemplarisch soll hier das Vorgehen für die Abfrage der Daten für die Pyrolyse von Triticaleganzpflanze (2471) bei einer Pyrolyseendtemperatur von 500 °C (Schnellaufheizung) erläutert werden: Nach dem Öffnen der Datei „Biomassepyrolyse.xls“ (s. Abbildung 4-73) lassen sich vier Registerkarten erkennen.

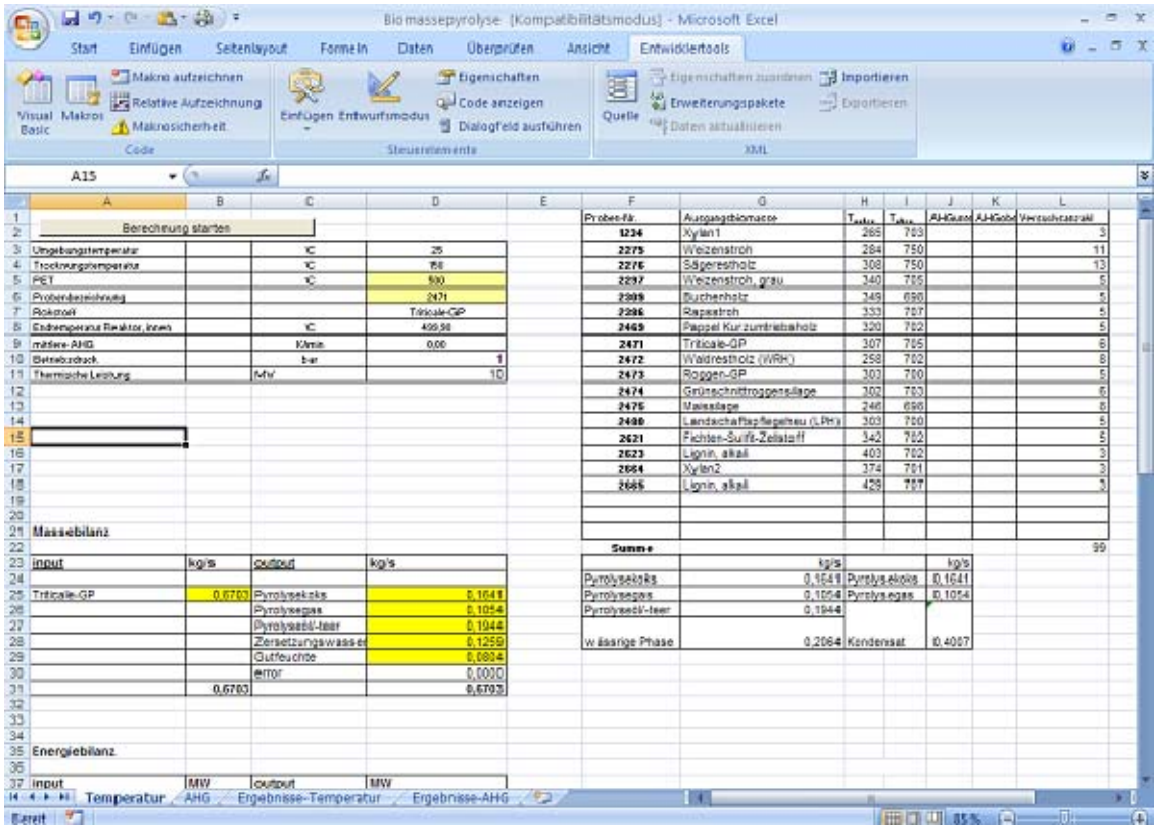


Abbildung 4-73: Datenauswahlwerkzeug unter der Benutzeroberfläche von MS Excel 2007

Die Registerkarten „Temperatur“ und „AHG“ dienen als Eingabe-Ausgabe-Werkzeug. Unter den geschützten Registerkarten „Ergebnisse-Temperatur“ und „Ergebnisse-AHG“ sind die Daten der experimentellen Untersuchungen und thermodynamischen Modellierung hinterlegt.

Da im gewählten Beispiel die Pyrolyseendtemperatur das Hauptauswahlkriterium ist, wird das Tabellenblatt „Temperatur“ ausgewählt. Die Konkretisierung der Auswahlkriterien (gelb hinterlegte Felder in Abbildung 4-74) erfolgt in dem in Abbildung 4-74 gezeigten Eingabemenü:

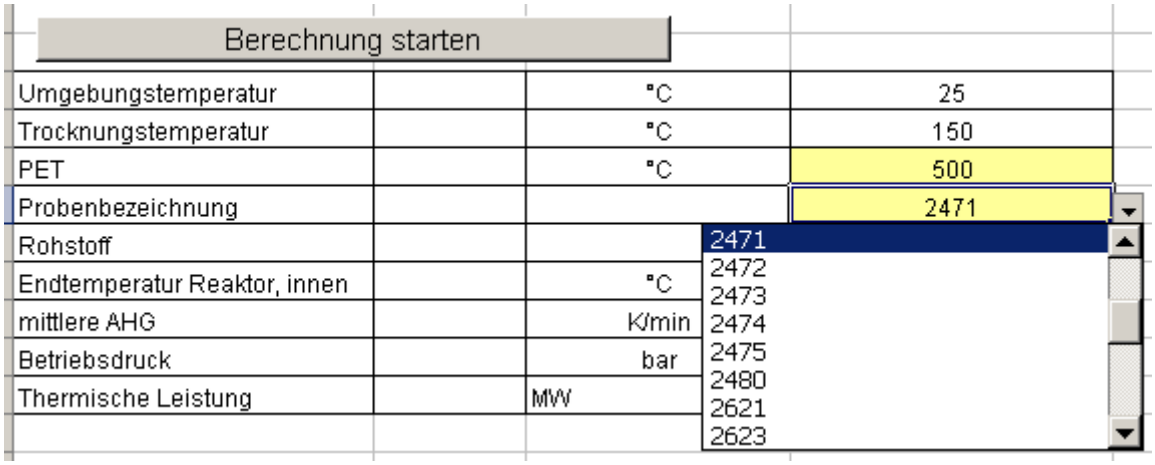


Abbildung 4-74: Eingabemenü der Registerkarte „Temperatur“

Über ein Pulldown-Menü kann die Biomasseart anhand der Probennummer (s. Tabelle 4-12) eindeutig definiert werden. Die Pyrolyseendtemperatur ist beliebig aus dem ebenfalls in Tabelle 4-12 genannten Temperaturbereich auszuwählen und im entsprechenden Feld (über der Probennummer) einzutragen. Durch die Betätigung des Buttons „Berechnung starten“ wird das erstellte Makro ausgeführt und die jeweiligen Ergebnisse entsprechend den gewählten Auswahlkriterien ausgegeben. In Abbildung 4-75 ist die Massebilanz (ausschließliches Ergebnis der experimentellen Untersuchungen) dargestellt.

Massebilanz

input	kg/s	output	kg/s
Triticale-GP	0,6703	Pyrolysekoks	0,1641
		Pyrolysegas	0,1054
		Pyrolyseöl/-teer	0,1944
		Zersetzungswasser	0,1259
		Gutfeuchte	0,0804
		error	0,0000
	0,6703		**0,6703**

Abbildung 4-75: Input und Outputdaten der Massebilanz

Die ermittelten Masseströme beziehen sich jeweils auf eine Brennstoffwärmeleistung (Einsatzstoff) von 10 MW. Andere Baugrößen können über lineare Skalierung ermittelt werden.

Abbildung 4-76 zeigt die Aufteilung der Pyrolyseprodukte. Hier wird die für die Bilanzierung/Modellierung gewählte Unterscheidung der Pyrolyseprodukte in Koks, Gas, Teer/Öl und wässrige Phase (Zersetzungswasser + Gutfeuchte) aufgehoben und die übliche Einteilung als Koks, Gas und Kondensat vorgenommen.

	kg/s		kg/s
Pyrolysekoks	0,1641	Pyrolysekoks	0,1641
Pyrolysegas	0,1054	Pyrolysegas	0,1054
Pyrolyseöl/-teer	0,1944		
wässrige Phase	0,2064	Kondensat	0,4007

Abbildung 4-76: Output Pyrolyseprodukte

Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen und thermodynamischen Modellierung (gelb hinterlegt) für den jeweiligen Versuchspunkt werden als Gesamtenergiebilanz (Abbildung 4-77) dargestellt.

Energiebilanz

input	MW	output	MW
Triticale-GP	10,0000	Pyrolysekoks	4,3653
		Pyrolysegas	0,5062
		Pyrolyseöl/-teer	5,2169
		Zersetzungswasser	0,0000
		Gutfeuchte	0,0000
Q-DECOMB	3,1692	K-Gas	0,0156
Q1	0,3278	K-Oel	0,0763
Q2	0,4252	K-ZW	0,2170
Q3	0,0561	K-Koks	0,3214
		K-H2O	0,2721
		QGAS	0,0955
		QOEL	0,8567
		QZW	0,8327
		QKOKS	0,3146
Fehler (absolut)	-0,8882		
Fehler (relativ)	-6,79%		
	13,0902		**13,0902**

Abbildung 4-77: Outputdaten zur Energiebilanz

Die detaillierte Erläuterung der einzelnen Bilanzpunkte wurde unter Kapitel 4.5.3 vorgenommen.

Ergänzend zur umfassenden Energiebilanz wird der für die Beheizung des Pyrolyseprozesses erforderlich Input an Pyrolyseprodukt als Brennstoff ausgewiesen. Die Berechnung in ASPENplus™ erfolgt über ein Verbrennungsmodell mit einem feuerungs-

technischen Wirkungsgrad von 85 %. Dabei wird davon ausgegangen, dass zunächst das Pyrolysegas zur Deckung des Wärmebedarfs herangezogen wird. Reicht dessen Heizwertstrom nicht aus können wahlweise ein Teil des Kokses oder der Teer/Öl-Fraktion eingesetzt werden. Die Ausgabe erfolgt in Prozent vom Mengenstrom des jeweiligen Produktes.

Die Abfrage von Ergebnissen aus der Variation der Aufheizgeschwindigkeit (AHG) erfolgt analog unter der Registerkarte „AHG“.

4.5.5 Ergebnisse zur Modellierung der Biomassepyrolyse

Die Ergebnisse der Berechnungen mit ASPENplus™ werden nachfolgend am Beispiel der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) erläutert und im Weiteren die Unterschiede/Gemeinsamkeiten für die verschiedenen Rohstoffe diskutiert.

Abbildung 4-78 zeigt zunächst schematisch die Bilanz der chemisch gebundenen Energien für die Pyrolyse bei 500 °C. Die angegebenen Werte basieren dabei auf den experimentell in der Festbettpyrolyseanlage ermittelten Werten (Ausbeuten, Energieinhalte) und sind auf einen der Brennstoffwärmeleistung von 10 MW entsprechenden Massenstrom an Holz (W = 12 Ma.-%) umgelegt.

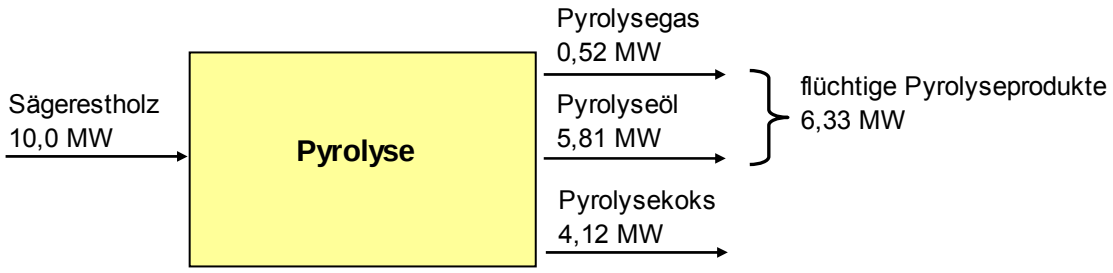


Abbildung 4-78: Bilanz der chemisch gebundenen Energien auf Basis des Heizwertes für die Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 500 °C

Die schematische Darstellung in Abbildung 4-79 zeigt zusätzlich die mittels ASPENplus™ berechneten Wärmeströme (fühlbare Wärme, notwendige Wärmemenge für die Beheizung des Reaktors und somit die gesamte Energiebilanz der Pyrolyse des Sägerestholzes (Fichte rindenfrei, 2276) bei 500 °C. Die innerhalb des Modells entstehenden/verbrauchten Wärmeströme bleiben hierbei unberücksichtigt. Demnach sind für die Beheizung des Reaktors 0,76 MW notwendig.

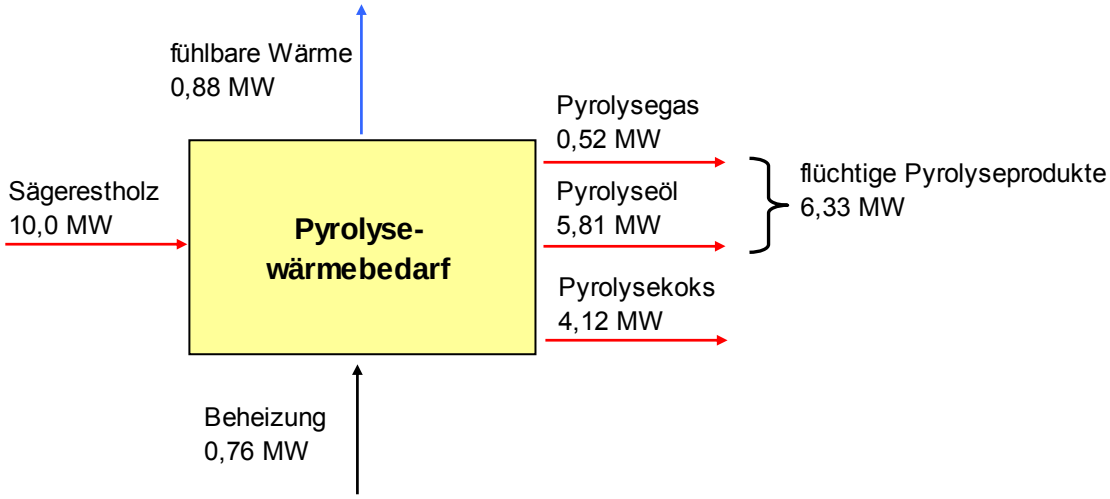


Abbildung 4-79: Mittels ASPENplus™ berechnete Energiebilanz für die Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 500 °C

In Abhängigkeit von der Temperatur ergeben sich bei der Pyrolyse des Sägerestholzes die in Abbildung 4-80 dargestellten Wärmeströme. Die Brennstoffwärmeleistung (BWL) bleibt konstant bei 10 MW. Zum Input zählt weiterhin die notwendige Wärmemenge zur Aufheizung des Brennstoffes (inkl. Gutfeuchte) auf die Pyrolyseendtemperatur und die von ASPENplus™ berechnete Wärme für die Zerlegung des Einsatzstoffes in die Elemente (QDECOMB), welche unabhängig von der Temperatur ist. Es ergibt sich somit ein über die Pyrolysetemperatur ansteigender Input-Wärmestrom, da der Einsatzstoff auf eine entsprechend höhere Temperatur erwärmt werden muss. Der Output-Wärmestrom setzt sich aus der physikalischen und der chemisch gebundenen Wärme sowie den Bildungsenthalpien der Pyrolyseprodukte Koks, Teer/Öl, Gas und Wasser zusammen. Für Teer/Öl steigen die Bildungswärmen mit zunehmender Temperatur erheblich, während sich für Koks eine Abnahme ergibt. Ab 600 °C liegen die Werte beim Koks unterhalb von 0,02 MW und gehen bei 700 °C sogar kurz ins Negative über. Beim Gas zeigt sich bis 500 °C eine leichte Erhöhung, oberhalb bleiben die Werte annähernd konstant bei ca. 0,11 MW. Der Koks weist bis ca. 400 °C und Teer/Öl ab 550 °C die höchsten Bildungsenthalpien auf. Die Summe der von ASPENplus™ berechneten Werte für die Bildungsenthalpien der Pyrolyseprodukte liegt zwischen 2,0 (600 °C) und 3,02 MW (308 °C) und ist somit immer geringer als die Zerlegungswärme der Biomasse (QDECOMB = 3,04 MW).

Vergleicht man den Input und Output an Wärme des Pyrolyseprozesses zeigt sich für niedrige Temperaturen, dass der Output an Wärme den Input übersteigt. Dieser Effekt kehrt sich ab 468 °C ins Gegenteil um. Die Inputströme an Wärme unterscheiden sich für die verschiedenen Einsatzstoffe nur wenig. Dies liegt daran, dass die Elementarzusammensetzungen der Biomassen sehr ähnlich sind, weswegen die Zerlegungswärmen (QDECOMB) nur in einem kleinen Bereich variieren (2,6…3,2 MW). Auch die für die Beheizung notwendigen Wärmeströme liegen in ähnlichen Größenordnungen. Der Outputwärmestrom hingegen variiert in Abhängigkeit von der Biomasse, da dort die aus den Pyrolyseversuchen ermittelten Daten zur Zusammensetzung und zum Energieinhalt der Pyrolyseprodukte eingehen.

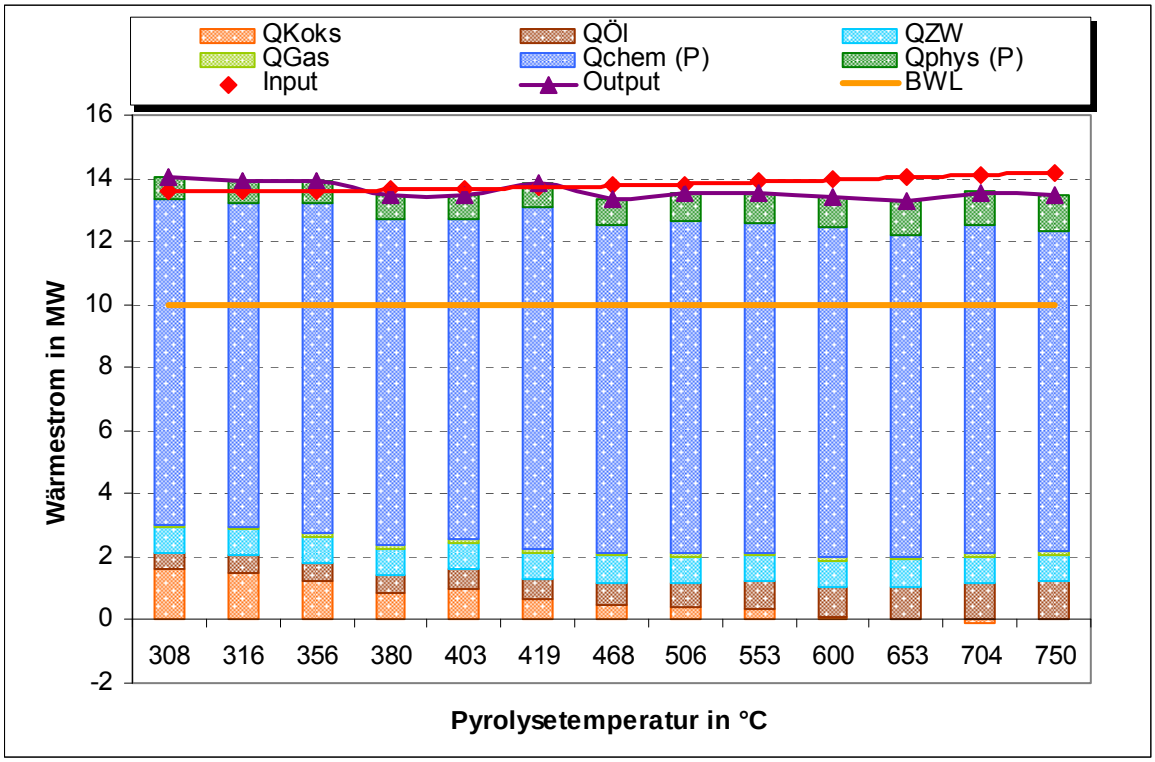


Abbildung 4-80: **In ASPENplus™ berechnete Energiebilanz für die Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) – Datenbasis Pyrolyse im Festbettreaktor, Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung**

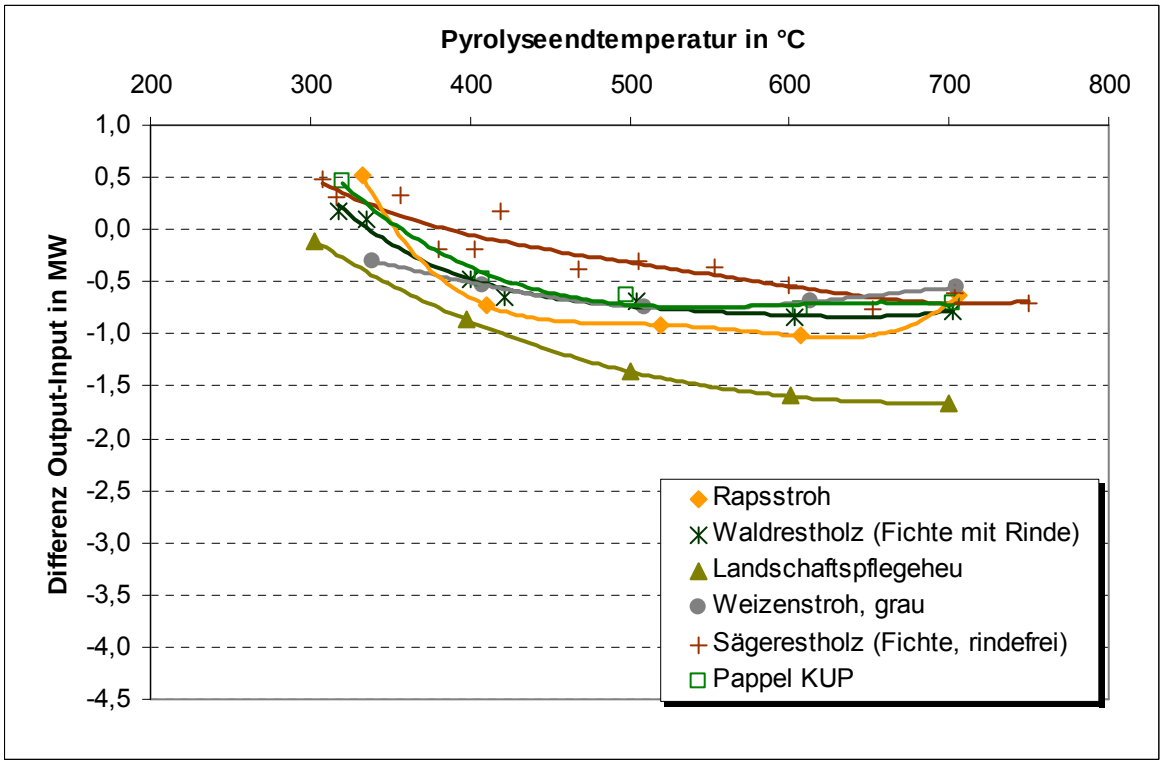


Abbildung 4-81: **Differenz zwischen Output und Input (Energiebilanz; Berechnungsergebnisse ASPENplus™) für die holz- und halmgutartigen Biomassen**

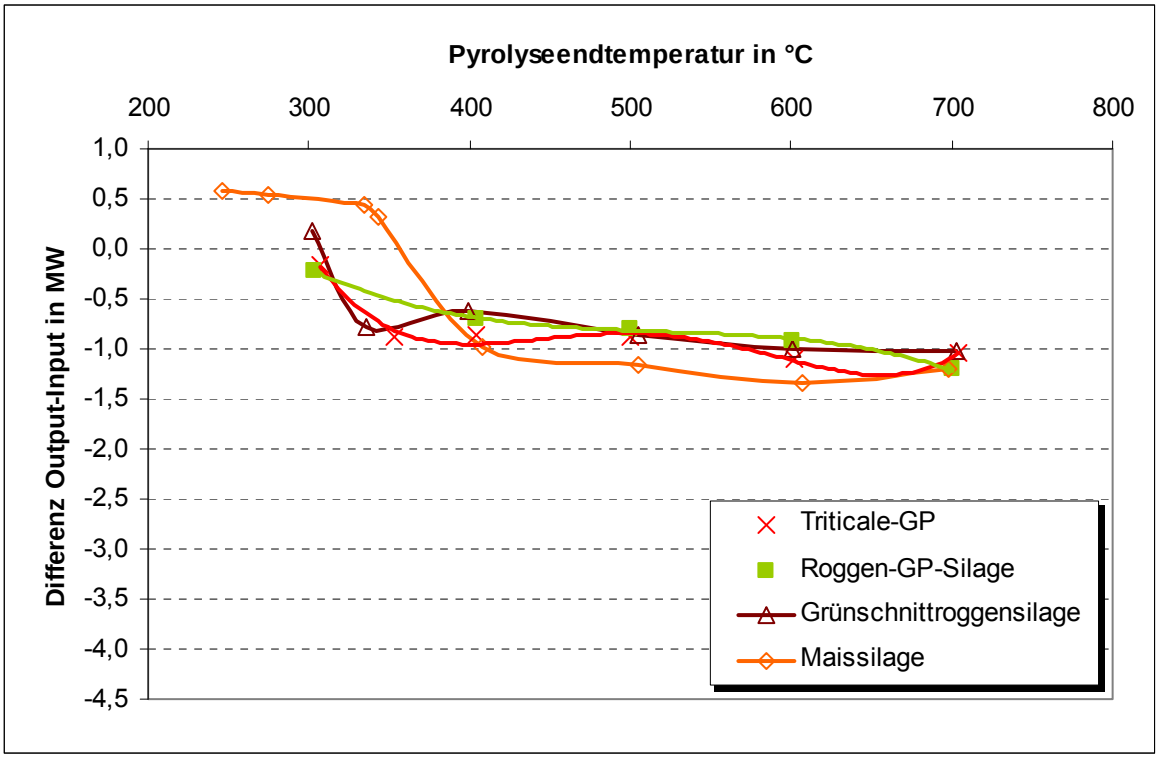


Abbildung 4-82: Differenz zwischen Output und Input (Energiebilanz; Berechnungsergebnisse ASPENplus™) für die Silagen und Triticale-Ganzpflanze

Abbildung 4-81 und Abbildung 4-82 zeigen daher die Differenz zwischen Output- und Inputwärmestrom für die verschiedenen Biomassen in Abhängigkeit von der Pyrolysetemperatur. Bei allen Biomassen übersteigt ab ca. 400 °C der austretende den eingebrachten Wärmestrom. Dabei ergeben sich für die Silagen Größenordnungen zwischen 0,6 und 1,4 MW, während bei den Hölzern sowie bei Stroh die Differenz niedriger liegt (0…0,8 MW bzw. 0,5…1,0 MW). Bei der Pyrolyse von Landschaftspflegeheu > 400 °C ergeben sich Werte zwischen 0,8 und 1,7 MW. Die Abnahme des Outputwärmestroms gegenüber dem Inputwärmestrom mit steigender Temperatur liegt dabei im starken Rückgang der Bildungsenthalpie des Kokses begründet, da dessen Kohlenstoffgehalt sehr hoch ist und weiter zunimmt.

Dass die Bildungsenthalpie des Kokses einen großen Einfluss auf die Energiebilanz besitzt, zeigt auch Abbildung 4-83. Bei der Pyrolyse von Weizenstroh ergeben sich bereits ab 312 °C größere eintretende verglichen mit den austretenden Wärmeströmen. Die Bildungsenthalpie des Kokses nimmt im Temperaturbereich bis 508 °C stetig ab und erreicht ab 326 °C negative Werte. Zwischen 508 und 526 °C gibt es einen sprunghaften Anstieg der berechneten Bildungsenthalpie des Kokses auf einen Wert von 11,5 MW. Hier zeigt sich eine Unzulänglichkeit des Modells bzw. der Simulationssoftware. ASPENplus™ generiert für die Berechnung der Bildungsenthalpie eine Pseudokomponente deren Heizwert und Zusammensetzung (Immediat-, Elementaranalyse) den experimentell ermittelten Daten entspricht. Diese Komponente entspricht nicht der realen Koksstruktur. Der hohe ausgegebene Wert ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass für die Bildungsenthalpie zwei Lösungen nebeneinander existieren. Derartige Effekte können auftreten, wenn die Kriterien für das Konvergieren des Modells mit hohen Toleranzen belegt sind. Eine weitere Ursache kann auch ein Sprung in der Zusammensetzung oder beim Heizwert des Kokses sein. Dies konnte aber nach Überprüfung der experimentellen Daten ausgeschlossen werden. Bei den in die Modellierung einbe-

zogenen Biomassen wiesen lediglich die Ergebnisse für die Pyrolyse von Weizenstroh eine derartige Unzulänglichkeit auf. Bei der Nutzung des in ASPENplus™ erstellten Modells für die Beschreibung der Biomassepyrolyse ist zu berücksichtigen, dass die Berechnungen auf thermodynamischen Grundlagen erfolgen und somit Strukturen von Komponenten (z. B. Teer/Öl oder Koks), es sei denn sie werden dem Programm vorgegeben, unbeachtet bleiben. Daraus ergibt sich ein Bedarf für die Anpassung und Verbesserung des im Rahmen des Projektes erstellten Modells.

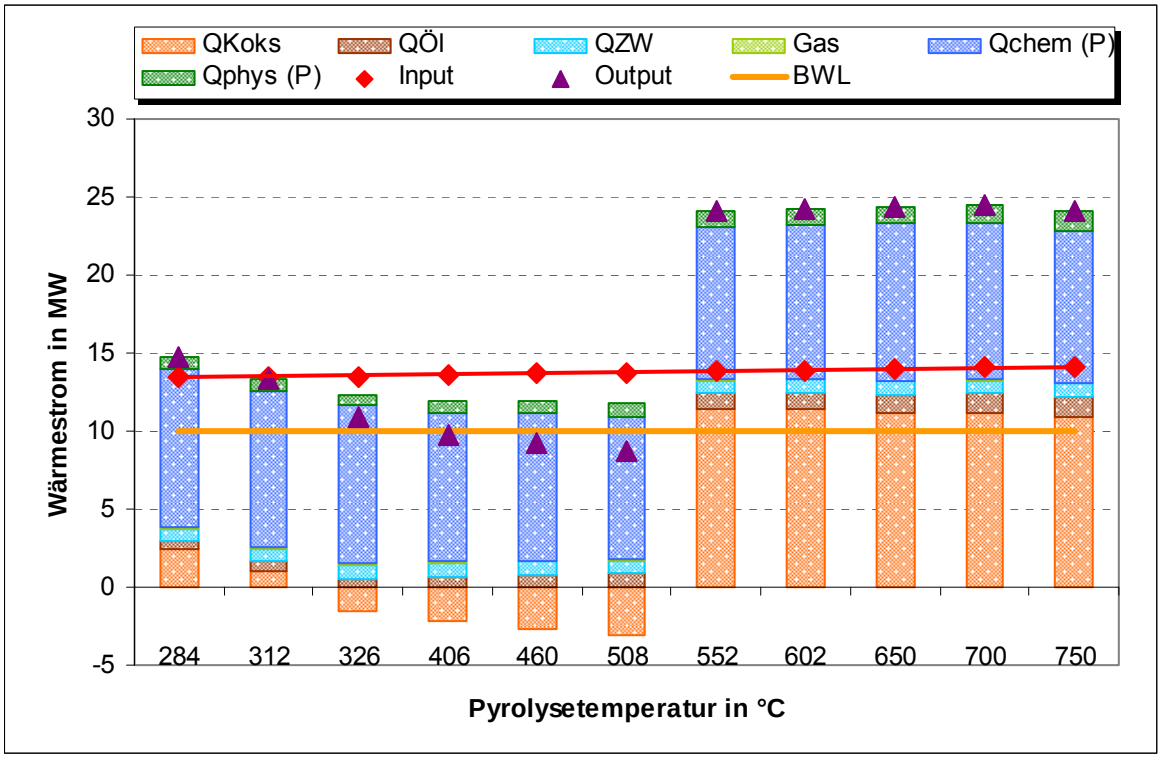


Abbildung 4-83: **In ASPENplus™ berechnete Energiebilanz für die Pyrolyse von Weizenstroh (2275) – Datenbasis Pyrolyse im Festbettreaktor, Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung**

Die bei der Modellierung erhaltenen Daten sind in Anhang M zusammenfassend für die einzelnen Rohstoffe dargestellt.

4.5.6 Zusammenfassung/Ausblick zur Modellierung der Biomassepyrolyse

Im Rahmen des Projektes ist es gelungen ein allgemeines Werkzeug zur Abbildung des Pyrolyseprozesses für verschiedene Biomassen unter variablen Prozessbedingungen zu erstellen, das eine stoffliche und energetische Bilanzierung der Pyrolyse auf Basis experimenteller Daten ermöglicht. Die wesentliche Leistung des Modells (ASPENplus™) besteht in der Berechnung der Gesamtenergiebilanz des Pyrolyseprozesses sowie der Ermittlung des notwendigen Prozessenergiebedarfs. Weiterhin wird ausgegeben wie viel eines Pyrolyseproduktes zur Deckung des Energiebedarfs notwendig ist. Ein wichtiger Aspekt der Modellierungsarbeit bestand darin eine automatisierte Kopplung der in MS Excel hinterlegten Daten zur Software ASPENplus™ zu schaffen. Dies ist über die Anwendung ASPENWorkbook™ in Kombination mit unter der Benutzeroberfläche der Tabellenkalkulation MS Excel arbeitenden Makros (VBA-Programmen) gelungen. Die mit Hilfe der Modellierungssoftware ASPENplus™ generierten Daten sind über eine entsprechende Arbeitsmappe in MS Excel mit Hilfe

eines entsprechenden Auswahlmenüs abrufbar, ohne dass der Anwender Kenntnisse mit dem Umgang in ASPENplus^{TM} benötigt.

Mögliche Weiterentwicklungen des Modells ergeben sich zu folgenden Aspekten:

- Anpassung des Modells an weitere Prozessparameter (Ergebnisse der Untersuchungen zum Einfluss des Systemdrucks) bzw. Erweiterung der Rohstoffbasis,
- molekulare Beschreibung des Pyrolyseöls über Pseudokomponenten oder real enthaltene Stoffe zur besseren Abbildung der Stoffeigenschaften,
- Hinterlegung der experimentell bestimmten Daten in Form von Regressionsgleichungen in Abhängigkeit von den Prozessparametern (Temperatur, Aufheizrate, Druck),
- Beschreibung der Verläufe von Produktverteilung, -zusammensetzung und -energieinhalt für verschiedene Prozessparameter in Abhängigkeit von Rohstoffeigenschaften (z. B. Stoffgruppenzusammensetzung, Flüchtigengehalt, O/C-Verhältnis usw.) und
- Kopplung der Simulation mit der in MS Access erstellten Datenbank.

5 Zusammenfassung

Um die anspruchsvollen klima- und energiepolitischen Ziele der Bundesregierung z. B. zur Senkung der Treibhausgasemissionen oder der Erhöhung der Biokraftstoffquoten umsetzen zu können, müssen neue Biomassepotentiale erschlossen und die relevanten Biomassetechnologien weiterentwickelt werden. Ein Schlüsselprozess für die energetische und stoffliche Nutzung nachwachsender Festbrennstoffe ist deren thermochemische Wandlung, über die Strom und Wärme sowie veredelte Energieträger und Chemierohstoffe gewonnen werden können. Je nach Zielstellung sind die Prozesse Verbrennung, Vergasung, Hydrierung und Torrefaction bzw. Pyrolyse sowie hydrothermaler Aufschluss nutzbar. Die Bedeutung der Pyrolyse ergibt sich dabei daraus, dass das Verfahren sowohl zur Erzeugung von Koks und flüssigen Kohlenwasserstoffen als auch zur Brennstoffaufbereitung nutzbar ist sowie einen Teilschritt bei Verbrennungs- und Vergasungsprozessen darstellt, der die Produktqualität signifikant beeinflussen kann. Die detaillierte Kenntnis des thermochemischen Verhaltens der Biomassen, insbesondere in der Pyrolysestufe, ist für die Entwicklung und Auslegung von Konversionstechnologien und -verfahren somit unverzichtbar.

Ziel des vom Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) geförderten Projektes war die Ermittlung von konsistenten Stoffdaten zu Produktverteilungen, -zusammensetzungen und -energieinhalten bei der Biomassepyrolyse unter technisch relevanten Prozessparametern.

Ausgehend von der Auswahl und der brennstofftechnischen Charakterisierung biogener Rohstoffe, welche für eine (groß-)technische energetische oder stoffliche Nutzung in Vergasungs-, Pyrolyse- oder Verbrennungsanlagen in Deutschland relevant sind, erfolgten umfangreiche Untersuchungen zum Pyrolyseverhalten der Einsatzstoffe. Dafür standen neben verschiedenen thermoanalytischen Methoden (HP-TGA, TG-DSC) eine eigens für diese Untersuchungen geplante und errichtete Druckpyrolyseanlage (wahlweise Fallrohr-/Festbettbetrieb) sowie eine Festbettlaborpyrolyseanlage zur Verfügung. Es konnte ein umfangreiches Versuchsprogramm abgearbeitet werden, welches die folgenden Parameter berücksichtigte:

- Rohstoffliche Einflussfaktoren: verschiedene holzartige, halmgutartige und silierte Biomassen (z. B. Waldrestholz – Fichte mit Rinde, Pappel aus Kurzumtrieb, Weizenstroh, Rapsstroh, Triticale-Ganzpflanze, Maissilage usw.), die Biopolymere Xylan (Hemicellulose), Cellulose, Lignin; insgesamt: 12 Biomassen, 5 Proben der Biopolymere sowie verschiedene Biomassemischungen
- Prozessparameter:
  - Temperatur: 200…800 °C
  - Druck: 1…30 bar
  - Aufheizgeschwindigkeit: 5…150 K/min und 500 K/s (Fallrohr)
  - Verweilzeit: 0…30 min
- Brennstoffvorbereitung: diverse Partikelgrößen ≤ 5 mm

Insgesamt konnten ca. 250 Versuche in Labor- und Druckpyrolyseanlage sowie ca. 100 Versuche mit den thermoanalytischen Verfahren durchgeführt werden. Als Resultat stehen für die verschiedenen Einsatzstoffe und Prozessbedingungen folgende Daten zur Verfügung:

- Produktverteilung: Ausbeuten an Koks, Kondensat (gesamt) → Zersetzungswasser + Teer/Öl, Pyrolysegas;
- Produktzusammensetzung: Immediatanalyse (Wasser, Asche, Flüchtige, Fixer Kohlenstoff) für Koks; Elementaranalyse (Kohlenstoff, Wasserstoff, Stickstoff, Schwefel verbrennlich, Sauerstoff) für Koks, Teer/Öl, Gas; Komponentenzusammensetzung des Pyrolysegases;
- Energieinhalt: Brennwert/Heizwert der Produkte Koks, Teer/Öl, Pyrolysegas, Bilanz der chemisch gebundenen Energien;
- Elemente- und Energieverteilung: prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff enthaltenen Elemente sowie der chemisch gebundenen Energie auf die Pyrolyseprodukte;
- Verläufe zu Masseverlust und Masseänderungsgeschwindigkeit (TG/DTG) sowie
- Reaktionsenthalpien (TG/DSC) für die Biomassepyrolyse.

Die erhaltenen Stoff- und Energiebilanzdaten für die Pyrolyse verschiedener Einsatzstoffe wurden in eine Datenbank (MS Access 2007) implementiert und für die Modellierung mit Hilfe der thermodynamischen Simulationssoftware ASPENplus™ zur Verfügung gestellt. Es erfolgte die Entwicklung eines allgemeinen, stationären Modells zur Abbildung des Pyrolyseprozesses, welches auf den experimentell bestimmten Daten basiert. Zur Erleichterung der Dateneingabe in ASPENplus™ konnte eine Kopplung der in MS Excel hinterlegten Bilanzdaten über die Anwendung ASPENWorkbook™ realisiert werden. Diese erlaubt in Kombination, mit unter der Benutzeroberfläche der Tabellenkalkulation MS Excel arbeitenden Makros (VBA-Programmen), eine automatische Datenübernahme. Die mit der Simulationssoftware ASPENplus™ generierten Daten sind über eine entsprechende Arbeitsmappe in MS Excel mit Hilfe eines entsprechenden Auswahlmenüs abrufbar ohne dass der Anwender Kenntnisse im Umgang mit ASPENplus™ benötigt.

Nachfolgend werden die wesentlichen Erkenntnisse der durchgeführten Untersuchungen zusammengefasst und bewertet.

Biomasseauswahl und brennstofftechnische Charakterisierung

- Als Referenzbrennstoffe für die Untersuchungen wurden Biomassen ausgewählt, die bereits eine hohe Relevanz für die energetische Nutzung in Deutschland besitzen (Sägerestholz – Fichte, rindenfrei) bzw. denen ein hohes Potential für den Einsatz in Anlagen zur thermochemischen Biomassekonversion bescheinigt wird (Weizenstroh). Neben diesen Einsatzstoffen konnten auch andere holzartige und halmgutartige Biomassen (z. B. Pappel aus Kurzumtrieb, Triticale-Ganzpflanze, verschiedene Silagen) betrachtet werden, die zukünftig eine Rolle beim Einsatz in derartigen Verfahren spielen könnten. Insgesamt wurden 15 verschiedene Biomassen und 5 Biomassekomponenten in die Untersuchungen einbezogen.

- Die brennstofftechnische Charakterisierung ergab biomassetypische Zusammensetzungen mit hohen Flüchtigengehalten (72…86 Ma.-% wf), niedrigen Kohlenstoff-(45…51 Ma.-% wf) und hohen Sauerstoffanteilen (38…43 Ma.-% wf) sowie niedrigen Heizwerten (17…19 MJ/kg wf). Die Wasserstoffgehalte schwankten um 6 Ma.-% (wf). Die holzartigen Biomassen weisen einen geringen Ascheanteil auf, der i.d.R. bei < 1 Ma.-% (wf) liegt, jedoch mit zunehmendem Rindenanteil ansteigt. Bei den Halmgütern und Silagen sind Werte zwischen 4 und 10 Ma.-% (wf) üblich. Zudem enthalten diese Biomassen hohe Anteile an bei der thermochemischen Konversion problematischen Elementen wie Kalium, Chlor und Stickstoff. Die größten Kaliummengen sind im Weizenstroh, Rapsstroh und den Ganzpflanzen-Silagen enthalten (1,5 bis 2,0 Ma.-% wf). Hohe Stickstoffgehalte finden sich im Landschaftspflegeheu und den Ganzpflanzen-Silagen (1,8…2,4 Ma.-% wf).

Stoffgruppenzusammensetzung

- Zur Bestimmung der einzelnen Stoffgruppen existieren in der Literatur verschiedene Verfahren, jedoch sind davon nur wenige standardisiert und dann zumeist auf Holz als Einsatzstoff angepasst (z. B. Klason-Lignin nach TAPPI 222 om-98). In diversen Voruntersuchungen konnten einige Methoden auf die Charakteristik anderer Biomassen wie Silagen und Stroh angepasst werden, die zufriedenstellende Ergebnisse lieferten.
- Bei der Einteilung der untersuchten Biomassen in die drei Gruppen: Holzartige, Halmgutartige und Silagen lassen sich charakteristische Werte für die Stoffgruppenzusammensetzung zuordnen. Bezüglich der Anteile der Biopolymere ergibt sich folgende Einteilung: (a) Lignin: Nadelholz (28…35 Ma.-% wf) > Laubholz > Stroh/Heu > Silage (12…13 Ma.-% wf); (b) Cellulose: Holz (40…50 Ma.-% wf) > Stroh/Heu > Silage (20…25 Ma.-% wf); Hemicellulose: Silage > (32…53 Ma.-% wf) > Stroh/Heu > Laubholz > Nadelholz (um 21 Ma.-% wf). Für die Extraktstoffe ist eine Einschätzung schwierig, da je nach Bestimmungsverfahren auch bereits größere Zuckeranteile aus der Biomasse herausgelöst werden.

Einfluss der Temperatur

Der Einfluss der Temperatur auf das Pyrolyseverhalten wurde im Bereich zwischen 200 und 750 °C in der Festbettlaborpyrolyseanlage bei schnellen Aufheizgeschwindigkeiten (bis 150 K/min) für verschiedene Biomassen mit einer Körnung von < 2 mm untersucht.

- *Produktverteilung:* Eine steigende Pyrolysetemperatur bewirkt eine Abnahme der Feststoff-(Koks)ausbeute infolge des fortschreitenden pyrolytischen Abbaus der organischen Matrix bzw. der Entbindung flüchtiger Bestandteile. Die Kondensatausbeute steigt folglich, jedoch nur bis 500 °C. Bei höheren Temperaturen kommt es infolge der thermischen Instabilität der Kohlenwasserstoffe zu einem leichten Rückgang (analog verhält sich Teer/Öl). Die Entbindung des Zersetzungswassers ist bis 500 °C abgeschlossen, da es überwiegend aus der Abspaltung von OH-Gruppen aus den Zuckermolekülen resultiert. Die Gasausbeuten steigen kontinuierlich an.
- *Produktzusammensetzung:* Der Feststoff erfährt mit steigender Temperatur eine Anreicherung an Kohlenstoff bei gleichzeitiger Abnahme von Sauerstoff und Was-

serstoff infolge der zunehmenden Freisetzung dieser Elemente in die Gasphase. Mineralische Komponenten sowie Stickstoff (insbesondere bei Anlagerung an aromatisch gebundenen Kohlenstoff) reichern sich ebenfalls in der Koksmatrix an. Die Teer/Öl-Zusammensetzung wurde nur wenig beeinflusst (leichte Zunahme an Kohlenstoff zuungunsten von Sauerstoff). Für die Stickstoffeinbindung im organischen Flüssigprodukt ergab sich aufgrund unterschiedlicher Bindungsmechanismen im Rohstoff kein einheitlicher Trend. Bis 600 °C zeigt sich eine starke Entbindung von CO und CO_2 (Primärprodukte der Pyrolyse) aus Decarboxylierungs-/Decarbonylierungsreaktionen der organischen Matrix. Ab 500 °C erfolgt eine starke Zunahme der Wasserstofffreisetzung durch Polykondensations-/Dehydrierungsreaktionen in der Koksmatrix sowie ab 400 °C eine deutliche Steigerung der Methanentbindung infolge von Methylgruppenabspaltungen.

- *Energieinhalt:* Der Koksbrennwert nimmt infolge der Kohlenstoffanreicherung zu. Ähnlich verhält sich auch der Pyrolysegasbrennwert, da mit steigender Temperatur vermehrt energiereiche Verbindungen wie H_2, CH_4 und andere C2- und C3-Kohlenwasserstoffe freigesetzt werden. Der Teer/Öl-Brennwert wird hingegen nur wenig beeinflusst.
- Generell ist festzustellen, dass der Einfluss der Temperatur auf die ablaufenden Mechanismen bei der Pyrolyse von Biomasse gegenüber den rohstofflichen Einflussfaktoren überwiegt. Es ergeben sich somit ähnliche Trends für die Ausbeuten und Zusammensetzungen der Produkte in Abhängigkeit der Temperatur. Jedoch verschieben sich in Abhängigkeit des Rohstoffes die Hauptzersetzungsbereiche und die Höhe der Werte für die genannten Größen.

Einfluss des Drucks

Die Untersuchungen zum Druckeinfluss erfolgten an der Fallrohrpyrolyseanlage für Sägerestholz (Fichte, rindenfrei) und Weizenstroh mit Partikelgrößen zwischen 0,2 und 0,5 mm bei 800 °C.

- Mit steigendem Druck bildet der Koks bei sehr hohen Aufheizraten zunehmend Partikel in Kugelform aus und der Oberflächenglanz erhöht sich. Grund für den erhöhten Glanz sind Anlagerungsreaktionen von Teerbruchstücken am Koks.
- Der Einfluss des Systemdrucks auf die Produktverteilung und -zusammensetzung ist für verschiedene Rohstoffe nicht einheitlich. Dies hängt vermutlich mit der unterschiedlichen Beeinflussung des Pyrolyseverhaltens der Biopolymere zusammen, deren Anteile sich in den Biomassen teilweise deutlich unterscheiden.
- Bei der Pyrolyse von Sägerestholz kommt es zwischen 1 und 10 bar zu einer deutlichen Abnahme der Gasausbeute sowie zu einem Anstieg der Koks und Flüssigproduktausbeute. Verbunden mit der deutlichen Reduzierung der C2- und C3-Kohlenwasserstoffe sowie des Wasserstoffs im Gas deutet dies auf sekundäre Pyrolysereaktionen in Form von Anlagerungsreaktionen gasförmiger Radikale am Koks bzw. Rekombinationsreaktionen in der Gasphase (Erhöhung Flüssigproduktausbeute) hin. Bei sehr hohen Drücken (≥ 20 bar) nehmen die Ausbeuten an CO und CO_2 im Gas ab und der Koks weist einen geringeren Abbaugrad auf (Flüchtige ↑, Fixer Kohlenstoff ↓, Sauerstoff ↑). Mögliche Ursachen sind die Hemmung von Decarboxylierungs-/Decarbonylierungsreaktionen der Feststoffmatrix

oder die erneute Anlagerung bereits entbundener sauerstoffhaltiger Bruchstücke am Koks. Zudem steigt die Koksausbeute zwischen 20 und 30 bar zuungunsten der Gasausbeute.

- Bei den Untersuchungen zum Druckeinfluss auf die Weizenstrohpyrolyse im Fallrohrreaktor ist die Deutung der auftretenden Effekte schwierig, da sich die Auswirkungen des Drucks und der Temperatur (aufgrund der Ablagerungen im Reaktionsrohr) überlagern. Dennoch ist bei Drücken bis 15 bar das Auftreten von sekundären Reaktionen zu vermuten, wobei überwiegend Anlagerungsreaktionen am Feststoff ablaufen, da sowohl Gas- als auch Kondensatausbeute abnehmen. Zudem steigen der Flüchtigen-, Sauerstoff- und Wasserstoffgehalt im Koks. Bezüglich der C2- und C3-Kohlenwasserstoffe konnte der gleiche Trend wie beim Sägerestholz festgestellt werden.

Einfluss der Aufheizrate

Die Variation der Aufheizgeschwindigkeit erfolgte im Bereich zwischen 5 und 150 K/min in der Festbettpyrolyseapparatur für verschiedene Biomassen (Körnung: < 2 mm) bei 400 bzw. 500 °C.

- *Produktverteilung:* Steigende Aufheizgeschwindigkeiten führen zur Erhöhung der Kondensatausbeute zuungunsten der Koks- und Gasausbeute. Die Ursachen liegen in der schnelleren Überwindung des Temperaturbereichs in dem die Flüchtigenentbindung stattfindet, wodurch sich kürzere Verweilzeiten der Flüchtigen im Partikel und somit eine Hemmung von sekundären Pyrolysereaktionen zwischen Feststoff und Kohlenwasserstoffen ergeben. Zudem werden Koksbildungsreaktionen (z. B. Dehydratation zu Anhydrocellulose), die im Allgemeinen sehr langsam ablaufen, gehemmt. Die Teer/Öl-Ausbeute steigt durch die Begünstigung von Depolymerisationsreaktionen der Cellulose und der Flüchtigenentbindung.
- *Produktzusammensetzung:* Der Feststoff unterliegt bei hohen Aufheizgeschwindigkeiten einer unvollständigen Umsetzung, weshalb sich höhere Restflüchtigen- sowie Sauerstoffgehalte zuungunsten des Kohlenstoffs ergeben. Im Teer/Öl steigt der Sauerstoffgehalt, wobei gleichzeitig die Anteile an Kohlenstoff und Wasserstoff abnehmen, da durch die schnelle Aufheizgeschwindigkeit die Spaltung sauerstoffhaltiger Gruppen insbesondere in der Cellulose begünstigt wird. Bezüglich der Gaszusammensetzung waren keine einheitlichen Trends in Abhängigkeit von der Aufheizrate feststellbar, da hier rohstoffliche Einflüsse überwiegen.
- Bezüglich der Differenz der chemisch gebundenen Energien in Produkten und Edukten ergab sich eine Abnahme der Exothermie bzw. eine Zunahme endothermer Reaktionen infolge der erhöhten Flüchtigenentbindung und der verminderten Koksbildung.
- Die Aufheizgeschwindigkeit besitzt verglichen mit der Temperatur einen wesentlich geringeren Einfluss auf die Produktverteilung und -zusammensetzung bei der Biomassepyrolyse.

Einfluss der Verweilzeit

Die Untersuchungen zum Einfluss der Feststoffverweilzeit bei einer definierten Pyrolysetemperatur im Bereich bis 30 min wurden exemplarisch am Beispiel des Sägerestholzes (Fichte, rindenfrei) bei 500 °C in der Festbettlaborpyrolyseanlage durchgeführt.

- Der Einfluss der Verweilzeit ist bei Temperaturen < 400 °C stärker ausgeprägt, da die Hauptphase der Zersetzung hier noch nicht abgeschlossen ist. Folglich steigen bei Verweilzeiten bis 10 min die Ausbeuten an Flüssigprodukt und Gas bei gleichzeitigem Absinken der Koksausbeute. Eine weitere Erhöhung der Verweilzeit auf 30 min beeinflusst die Produktverteilung kaum.
- Der Einfluss der Feststoffverweilzeit bei höheren Temperaturen besteht im Wesentlichen darin, dass es zu Strukturänderungen in der Koksmatrix kommt, wobei insbesondere Wasserstoff und Methan abgespalten werden. Diese Reaktionen laufen sehr langsam ab und werden durch die längere Verweilzeit bei höheren Temperaturen begünstigt. Die Masseabnahme des Kokses ist dabei jedoch relativ gering. Außerdem können insbesondere bei längeren Verweilzeiten (30 min) sekundäre Crackreaktionen der Flüchtigen am Koks auftreten, die mit einer Bildung von Kohlenstoff (Anstieg Koksausbeute), einer Verringerung der Teer/Öl-Ausbeute und einer zunehmenden Gasproduktion einhergehen.
- Für die Pyrolyse des Sägerestholzes (Fichte, rindenfrei) bei 550 °C ergeben sich endotherme Wärmetönungen, deren Beträge mit steigender Verweilzeit abnehmen. Diese Zunahme exotherm ablaufender Reaktionen könnte aus Rekombinationsreaktionen im Koks resultieren, die zur Bildung aromatischer Strukturen führen. Dies wird durch den Anstieg des Kohlenstoffgehaltes im Koks belegt.

Einfluss der Brennstoffvorbereitung

- Im untersuchten Bereich zwischen < 1,25 und 5 mm konnte kein Einfluss der Partikelgröße bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte, rindenfrei) bei 500 °C im Festbettreaktor festgestellt werden.

Pyrolyse von Biomassemischungen

Der Einfluss von Biomassemischungen wurde am Beispiel der Pyrolyse von Waldrestholz/Grünschnittroggensilage, Waldrestholz/Weizenstroh und Sägerestholz/Maissilage für verschiedene Mischungsverhältnisse (25/75, 50/50, 75/25) bei 500 °C in der Festbettlaborpyrolyseanlage untersucht.

- Bei der Pyrolyse von Mischungen aus verschiedenen Biomassen, die unterschiedliche Gehalte an Lignin, Hemicellulose und Cellulose aufweisen, sind Effekte festzustellen, die vom rein additiven Verhalten (Mischungsregel) abweichen. Dies bedeutet, dass entstehende Pyrolyseprodukte miteinander interagieren und somit eine Verschiebung in der Produktverteilung, der -zusammensetzung und dem Energieinhalt auftritt. Die Auswirkungen sind jedoch mit einer Erhöhung der Zumischrate an halmgutartiger Biomasse zum Holz mitunter nicht gleich. So können sich z. B. bei der Produktverteilung von der niedrigen zur hohen Zumischrate die Effekte umkehren. Eindeutige Trends ergeben sich jedoch für das Pyrolysegas. Hier konnte für die Mischungen aus Waldrestholz und Weizenstroh bzw. Grünschnittroggensilage, unabhängig von der Zumischrate, eine Erhöhung der Gasausbeute festgestellt werden, die auf einem Anstieg der C2-Kohlenwasserstoffe (Ethan, Ethen) beruht, der sich auch in einem entsprechend höheren Brennwert niederschlägt. Im Koks sinkt der Flüchtigenanteil zugunsten des Gehaltes an fixem Kohlenstoff.

Pyrolyse der Stoffgruppen

Untersuchungen zum Pyrolyseverhalten der Stoffgruppen erfolgten in Abhängigkeit von der Temperatur (200 bis 700 °C) mit Xylan, Fichte-Sulfitzellstoff und Alkali-Lignin in der Festbettlaborpyrolyseanlage.

- *Produktverteilung:* Die Hauptzersetzungsphase liegt bei Cellulose und Xylan infolge ihrer relativ einheitlichen Struktur in einem engen Temperaturintervall (Cellulose: 300 bis 400 °C). Für Xylan ergibt sich ein 2-stufiger Abbau: 200 bis 300 °C (Hauptabbau) und 300 bis 500 °C. Lignin zersetzt sich allmähliche über einen breiten Temperaturbereich. Bei der Pyrolyse von Cellulose entstehen die höchsten und bei Lignin die niedrigsten Flüssigproduktmengen. Infolge ihrer Struktur bilden Xylan und Cellulose große Mengen an Zersetzungswasser (20 bis 30 Ma.-% waf), die aus der Abspaltung der OH-Gruppen aus den Zuckermolekülen resultieren. Für Lignin ergeben sich im Flüssigprodukt in etwa die gleichen Anteile für Teer/Öl und Zersetzungswasser. Xylan weist im gesamten untersuchten Temperaturbereich die höchste Gasausbeute auf. Danach folgen der Zellstoff und das Lignin.
- *Koks- und Teer/Öl-zusammensetzung:* Bei Temperaturen > 400 °C besitzt der Koks des Zellstoffs den geringsten Flüchtigenanteil und den höchsten Gehalt an fixem Kohlenstoff, gefolgt von Xylan und Lignin. Für den Koks aus der Ligninpyrolyse ergibt sich ein annähernd linearer Anstieg bzw. Abfall von Kohlenstoff bzw. Sauerstoff. Bei 700 °C liegen die Kohlenstoffgehalte der Kokse von Xylan und Lignin in ähnlichen Größenordnungen (ca. 92 Ma.-% waf). Das aus der thermischen Zersetzung des Zellstoffes resultierende organische Flüssigprodukt zeigt den geringsten Anteil an Kohlenstoff (ca. 60 Ma.-% waf) sowie Wasserstoff (ca. 7 Ma.-% waf) und den höchsten an Sauerstoff (30…40 Ma.-% waf). Der wesentlich geringere Sauerstoffgehalt im Lignin wird überwiegend in die Gasphase oder in Form von Zersetzungswasser freigesetzt, weshalb das Teer/Öl hohe Kohlenstoff- (ca. 70 Ma.-% waf) und Wasserstoff- (ca. 10 Ma.-% waf) sowie sehr geringe Sauerstoffanteile (< 7 Ma.-% waf) aufweist. Bei steigender Pyrolysetemperatur nimmt der Anteil an Kohlenstoff im Teer/Öl des Xylans zuungunsten von Sauerstoff zu (700 °C: C ca. 80, O ca. 12 Ma.-% waf).
- *Pyrolysegaszusammensetzung:* Lignin entbindet bei der Pyrolyse die größten und der Zellstoff die geringsten Mengen an Wasserstoff. Der Beginn der Freisetzung liegt bei Xylan bereits bei 400 °C, bei Zellstoff und Lignin bei 500 °C. Xylan setzt bei der Pyrolyse die größte Menge an CO_2 frei. Die hohen CO_2-Ausbeuten resultieren aus dem hohen Anteil an Säuregruppen (Uronsäuren), die über Decarboxylierungsreaktionen gespalten werden. Bis 500 °C ist die Primärpyrolyse des Xylans abgeschlossen und die Ausbeute an CO_2 stagniert. Die höchsten Ausbeuten an CO liefert die Pyrolyse des Zellstoffs, die niedrigsten die des Lignins. Für CO_2 liegen die Ausbeuten bei beiden Stoffen in einer ähnlichen Größenordnung. Bei der Freisetzung der C2-Kohlenwasserstoffe ergibt sich folgende Reihenfolge: Xylan > Zellstoff > Lignin.
- *Energieinhalt/Reaktionsenthalpie:* Der Teer/Öl-Brennwert ist bei Zellstoff infolge des hohen Sauerstoffgehaltes am niedrigsten (ca. 25 MJ/kg waf), danach folgen Xylan (ca. 27…29 MJ/kg waf) und Lignin (28…32 MJ/kg waf). Das Gas aus der Pyrolyse von Xylan und Zellstoff besitzt infolge des hohen CO_2-Anteils geringe

Brennwerte (2…8 MJ/kg). Bei Lignin ergeben sich hohe Brennwerte insbesondere ab 600 °C durch den starken Anstieg der Wasserstofffreisetzung (700 °C: 12,4 MJ/kg waf). Der Energieinhalt des Kokses liegt bei der Pyrolyse der Stoffgruppen der Biomasse bei Temperaturen > 400 °C in einer ähnlichen Größenordnung. Bezüglich der Wärmetönung ergab sich beim Xylan erst ab > 500 °C ein exothermer Verlauf. Der Zellstoff zeigte die charakteristische endotherme und das Lignin eine deutlich exotherme Wärmetönung bei der Pyrolyse.

- Der Einfluss der Temperatur auf die Pyrolyse der Stoffgruppen entspricht weitestgehend den bei der thermischen Zersetzung der Biomasse auftretenden Effekten.

Korrelationen zwischen Rohstoffeigenschaften und Pyrolyseverhalten

- *Gehalt an flüchtigen Bestandteilen:* Die Koksausbeute wird in Abhängigkeit des Flüchtigengehaltes der Biomasse kaum beeinflusst. Die Ausbeute an Flüssigprodukten nimmt zuungunsten der Gasausbeute bei steigendem Anteil flüchtiger Bestandteile im Einsatzstoff zu. Dies bedeutet, dass der höhere Anteil flüchtiger Komponenten vermehrt in kondensierbarer Form entbunden wird. Auch für die Teer/Öl-Zusammensetzung ergibt sich eine Korrelation. Der mit steigendem Flüchtigenanteil sinkende Kohlenstoff- und der gleichzeitig steigende Sauerstoffgehalt im organischen Flüssigprodukt ist nicht mit steigenden Sauerstoffgehalten in der Biomasse zu begründen, sondern resultiert vielmehr aus den Bindungsformen des Sauerstoffs in der organischen Matrix.
- Bei den Anteilen der Hauptkomponenten im Gas ließen sich Trends innerhalb der verschiedenen Biomassegruppen feststellen: CO: Stroh/Heu > Silage/Ganzpflanze > Holz; CO_2: Holz > Silage/Ganzpflanze > Stroh/Heu; CH_4: Holz > Silage/Ganzpflanze = Stroh/Heu. Betrachtet man hingegen die Ausbeuten z. B. an Kohlendioxid, dann ist diese bei Holz wesentlich geringer als bei den Halmgütern und den Silagen. Ursache hierfür ist der vermutlich höhere Anteil an Carboxylgruppen in der organischen Matrix, welche zu einem großen Teil in Hemicellulosen (als Uronsäuren) vorkommen. Diese werden über Decarboxlierungsreaktion, welche zur CO_2-Bildung führen, gespalten. Die Methylgruppenabspaltung scheint hingegen bei den holzartigen Biomassen begünstigt.
- Generell gestaltet sich eine Korrelationen von Produktverteilung und -zusammensetzung mit Rohstoffeigenschaften schwierig, da sich häufig verschiedenen Eigenschaften in ihren Effekten bei der Pyrolyse überlagern. Innerhalb bestimmter Biomassegruppen, wie z. B. Holz, Stroh oder den Silagen lassen sich Auswirkungen wesentlich besser bestimmen. Bei Betrachtung der gesamten Vielfalt der Biomassearten lassen sich Korrelationen in Abhängigkeit der Stoffgruppenzusammensetzung sowie z. B. dem Flüchtigengehalt ableiten, wobei jedoch immer wieder einzelne Ausnahmen auftreten können.

Ergebnisse der thermoanalytischen Untersuchungen

Die Ermittlung der „Reaktionsenthalpien“ bei der Pyrolyse verschiedener Biomassen mittels TG-DSC erfolgte bei einer Aufheizrate von 20 K/min bis 1.300 °C unter Normaldruck und Argonatmosphäre. Die Bestimmung der Masseverlustkurven mit der HP-TGA wurden bei einer Aufheizrate von 10 K/min bis 1.100 °C für Drücke zwischen 1 und 30 bar (Stickstoffatmosphäre) durchgeführt.

- *„Reaktionsenthalpie der Pyrolyse“*: Die ermittelten Reaktionsenthalpien ergeben sich bei der Pyrolyse immer aus der Summe aller in diesem Temperaturfenster ablaufenden Reaktionen. Die Untersuchungen mittels TG-DSC ergaben für die halmgutartigen Biomassen sowie die Silagen (Ausnahme: Maissilage) exotherme Wärmetönungen, während die Hölzer endotherme Effekte zeigten. Die Ursache liegt in den Stoffgruppenzusammensetzungen der Rohstoffgruppen. Während bei Holz Cellulose mit ca. 45 Ma.-% (stark endotherme Wärmetönung) den Hauptbestandteil darstellt, dominieren bei den Halmgütern und Silagen überwiegend Hemicellulosen (exotherme Wärmetönung). Diese Effekte traten auch bei den Bilanzversuchen auf. Aufgrund verschiedener apparatetechnischer Einflüsse sind die Ergebnisse jedoch nur in ihrem Trend nicht aber in ihrem Absolutwert belastbar bzw. übertragbar.
- *Druckeinfluss auf Masseverlust/Massenänderungsgeschwindigkeit:* Der Druckeinfluss übersteigt im untersuchten Bereich (bis 30 bar) den Effekt einer Veränderung der Aufheizrate deutlich. Als wesentlichster Punkt zu den Auswirkungen einer Druckerhöhung bei der Biomassepyrolyse ist die Verschiebung der Zersetzung zu höheren Temperaturen zu nennen. Eine Steigerung der Koksausbeute konnte mit Ausnahme der Strohsorten und der Roggenganzpflanzensilage ebenfalls festgestellt werden. Dennoch ergeben sich insbesondere in Abhängigkeit der Stoffgruppenzusammensetzung der Biomassen teils unterschiedliche Effekte. Bezüglich der Temperatur bei maximaler Zersetzungsrate lassen sich folgende Gruppen einteilen:
    - Hölzer
      (Cellulosegehalte um 45 Ma.-% wf):
      370…420 °C Celluloseabbau dominierend
    - Stroh, Roggenganzpflanzensilage
      (hohe Cellulose- und Hemicellulosegehalte zwischen 60…80 Ma.-% wf):
      325…392 °C Celluloseabbau dominierend
    - Triticale-GP, Mais-, Grünschnittroggensilage:
      (hohe Hemicellulosegehalte 40…45 Ma.-% wf):
      293…335 °C Hemicelluloseabbau dominierend.

Modellierung

- Das in ASPENplus^{TM} erstellte allgemeine, stationäre Pyrolysemodell (Vorgabe: Brennstoffwärmeleistung = 10 MW) ermittelt auf Basis der experimentell bestimmten Daten für Produktverteilung, -zusammensetzung und -energieinhalt die Wärmebilanz des Pyrolyseprozesses in Abhängigkeit der Temperatur bzw. Aufheizgeschwindigkeit. Dabei werden sieben Wärmeströme berechnet, die die Aufheizung der Biomasse sowie die Abkühlung der Pyrolyseprodukte als auch die Enthalpie zur Erzeugung der Pyrolyseprodukte und der Zersetzung der Biomasse in reaktionsfähige Komponenten beinhalten.
- Die Inputströme an Wärme unterscheiden sich für die verschiedenen Einsatzstoffe nur wenig, da die Elementarzusammensetzungen der Biomassen sehr ähnlich sind und sich somit Zerlegungswärmen (QDECOMB) ergeben, die nur in einem engen Bereich variieren (2,6…3,2 MW). Auch die für die Beheizung notwendigen Wärmeströme liegen in ähnlichen Größenordnungen. Der Outputwärmestrom hingegen

variiert in Abhängigkeit von der Biomasse, da dort die aus den Pyrolyseversuchen ermittelten Bilanzdaten.

- Bei allen Biomassen übersteigt ab ca. 400 °C der austretende den eingebrachten Wärmestrom. Dabei ergeben sich für die Silagen Größenordnungen zwischen 0,6 und 1,4 MW, während bei den Hölzern sowie bei Stroh die Differenz niedriger liegt (0…0,8 MW bzw. 0,5…1,0 MW). Bei der Pyrolyse von Landschaftspflegeheu > 400 °C ergeben sich Werte zwischen 0,8 und 1,7 MW. Die Abnahme des Outputwärmestroms gegenüber dem Inputwärmestrom mit steigender Temperatur liegt dabei im starken Rückgang der Bildungsenthalpie des Kokses begründet, da dessen Kohlenstoffgehalt sehr hoch ist und weiter zunimmt (Bildungsenthalpie Kohlenstoff = 0 kJ/kg).

Fazit

Die im Rahmen des Projektes erzeugte, umfangreiche Basis an Bilanzdaten für die Pyrolyse verschiedenster Biomassen bei unterschiedlichen Prozessbedingungen steht als Grundlage für die Modellierung von Pyrolyse-, Vergasungs- und Verbrennungsprozessen zur Verfügung. Insbesondere die Ergebnisse zum Pyrolysewärmebedarf bzw. der Energiebilanz liefern wichtige Erkenntnisse, welche zur Vereinfachung/Verbesserung der Auslegung technischer Anlagen zur thermochemischen Konversion beitragen können.

Ausgehend von den experimentell bestimmten Daten sind Ableitungen zur Eignung bestimmter Einsatzstoffe für Verfahren zur thermochemischen Wandlung möglich. Weiterhin können auf Basis der Anforderungen bezüglich des gewünschten Zielproduktes optimale Prozessbedingungen zur Maximierung der Ausbeute bzw. Erzielung einer bestimmten Produktqualität festgelegt werden. Auch Rückschlüsse zur Aufklärung der ablaufenden Reaktionsmechanismen bzw. zur gezielten Beeinflussung des Reaktionsverlaufes bei der Pyrolyse von Biomasse sind möglich. Die Ergebnisse erlauben zudem eine Abschätzung des Verhaltens für Einsatzstoffe mit ähnlicher Stoffgruppenzusammensetzung.

6 Ausblick

Mit den erhaltenen Bilanzergebnissen für die Pyrolyse verschiedener Biomassen in Abhängigkeit wesentlicher Prozessparameter wie Temperatur, Aufheizrate und Druck wurde eine umfangreiche Datenbasis für die Modellierung von Vergasungs-, Pyrolyse- und Verbrennungsprozessen geschaffen. Diese Datenbasis gilt es in Zukunft gezielt zu erweitern. Insbesondere zum Druckeinfluss im Hinblick auf großtechnische Anlagen zur Biomassevergasung (z. B. BtL-Verfahren) oder auch zur Co-Vergasung mit fossilen Energierohstoffen sollten sowohl weitere Rohstoffe als auch Temperaturen und Aufheizraten untersucht werden. Zudem sind die weitere Aufklärung der bei der Pyrolyse ablaufenden Reaktionsmechanismen sowie die Ermittlung von Reaktionskinetiken für die Produktbildung zur besseren mathematischen Beschreibung der Pyrolyse und zur gezielten Beeinflussung des Reaktionsverlaufs sinnvoll.

Eine Optimierung der Verfahren zur Stoffgruppenbestimmung und eine anschließende möglichst zuverlässige Analyse dieser Anteile bietet die Möglichkeit Korrelationen des Pyrolyseverhaltens mit diesen Rohstoffparametern herzustellen. Damit werden Vorhersagen des Pyrolyseverhaltens für weitere Rohstoffe, deren Stoffgruppenzusammensetzung bekannt ist, ermöglicht.

Die genaue Analytik der entstehenden Flüssigprodukte (insbesondere Kondensierbare) in Abhängigkeit der verschiedenen Prozessparameter für die Pyrolyse verschiedener Einsatzstoffe kann außerdem neue Wege für die stoffliche Nutzung von Pyrolyseprodukten aufzeigen. Zudem können derartige Verbindungen auch den thermodynamischen Simulationsmodellen vorgegeben werden, womit eine wesentlich realitätsnähere Abbildung des Prozesses gewährleistet wird. Im Bereich der Modellierung ergibt sich zudem Optimierungspotential bei der Vorgabe der Bilanzergebnisse. Hier sind geeignete Regressionsgleichungen zur Beschreibung von Ausbeute, Zusammensetzung und Energieinhalt zu entwickeln, die eine Interpolation zwischen den verschiedenen Untersuchungspunkten erlauben. Diese können anstelle der einzelnen Bilanzpunkte den Simulationsprogrammen als Datenbasis implementiert werden.

Im Hinblick auf eine stoffliche Nutzung des bei der Pyrolyse erzeugten Kokses bzw. der Reaktionsfähigkeit bei Vergasungsprozessen ergibt sich weiterer Untersuchungsbedarf bei den Kokseigenschaften (z. B. Roh-/Reindichte, Porengrößenverteilung, spezifische Oberfläche).

Die genannten Erweiterungen der Datenbasis ermöglichen am Ende eine je nach gewünschtem Zielprodukt bzw. zu erzielender Produktqualität optimale Rohstoffauswahl und somit einen schonenden Einsatz der Ressourcen an Energierohstoffe.

Abschließend ist anzumerken, dass sich sowohl im analytischen und experimentellen Bereich als auch bei der Modellierung bzw. mathematischen Beschreibung des Pyrolyseprozesses von Biomassen weiterer Forschungsbedarf ergibt.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1: Rangfolge der Wichtigkeit von Biomassearten für die zukünftige energetische Nutzung nach Vetter /Vetter 2007/ 16

Abbildung 3-2: Festbettreaktor mit kontinuierlichem Biomasseeintrag nach /Li2007/ 31

Abbildung 3-3: Anlagenkonfiguration für eine stationäre Wirbelschicht zur Pyrolyse von Biomasse nach /Wang2005/ 33

Abbildung 3-4: Anlagenkonfiguration eines Fallrohrreaktors für die Pyrolyse von Biomasse unter atmosphärischen Druckbedingungen und Temperaturen bis 800 °C /Li2004/ 34

Abbildung 3-5: Schema der Festbettlaborpyrolyseanlage 37

Abbildung 3-6: Fließschema der Druckpyrolyseanlage (DPA) mit Kennzeichnung der Hauptkomponenten 39

Abbildung 3-7: Feststoffdosierung mit Vorratsbehälter (rechts) und Schneckenfördersysteme (links) der Druckpyrolyseanlage 41

Abbildung 3-8: Druckpyrolyseanlage von vorn (links) und Koksauffangbehälter mit Begleitheizung und Prozessgasableitung (rechts) 42

Abbildung 3-9: Schematische Darstellung der Betriebsweisen der Druckpyrolyseanlage einschließlich Gasflüsse: a) Festbett (links), b) Fallrohr (rechts) 43

Abbildung 3-10: Schematische Darstellung der ersten Kondensationsstufe inkl. Gasflüsse (links) sowie Foto der Anlagenkomponente (rechts) 45

Abbildung 3-11: Schema zur Vorgehensweise bei der Rohstoffvorbereitung und der Analytik der Pyrolyseprodukte 49

Abbildung 4-1: Veränderungen des Feststoffes bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte, rindenfrei) in Abhängigkeit von der Temperatur bei Schnellaufheizung 61

Abbildung 4-2: Einfluss der Endtemperatur auf die Produktausbeuten bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 62

Abbildung 4-3: Ausbeuten der Hauptgaskomponenten in Abhängigkeit von der Temperatur bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte, rindenfrei) im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 63

Abbildung 4-4: Ausbeuten der C2- und C3-Kohlenwasserstoffe im Gas in Abhängigkeit von der Temperatur bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte, rindenfrei) im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 64

Abbildung 4-5: Immediatanalyse des Kokses in Abhängigkeit von der Temperatur bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte,

rindenfrei) im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 65

Abbildung 4-6: Elementarzusammensetzung des Kokses in Abhängigkeit von der Temperatur bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte, rindenfrei) im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 66

Abbildung 4-7: Elementarzusammensetzung Teer/Öl in Abhängigkeit von der Temperatur bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte, rindenfrei) im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 67

Abbildung 4-8: Verteilung der im Einsatzstoff enthaltenen Elemente auf die Pyrolyseprodukte in Abhängigkeit von der Temperatur bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 68

Abbildung 4-9: Verteilung der chemisch gebundenen Energie auf die Pyrolyseprodukte in Abhängigkeit von der Temperatur bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte, rindenfrei) mit Schnellaufheizung 69

Abbildung 4-10: Einfluss des Systemdrucks auf die Morphologie des Kokses bei der Pyrolyse von Weizenstroh (2296) bei 800 °C im Fallrohrreaktor *(Legende: a) Koks aus dem Koksauffangbehälter; b) Koks aus dem Reaktionsrohr)* 72

Abbildung 4-11: Einfluss des Systemdrucks auf die Produktverteilung bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2478) in der Druckpyrolyseanlage (Fallrohrbetrieb) bei 800 °C (Körnung: 0,2…0,5 mm) 74

Abbildung 4-12: Einfluss des Systemdrucks auf die Ausbeute der Hauptgaskomponenten bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2478) in der Druckpyrolyseanlage (Fallrohrbetrieb) bei 800 °C (Körnung: 0,2…0,5 mm) 75

Abbildung 4-13: Einfluss des Systemdrucks auf die Ausbeute der C2- und C3-Kohlenwasserstoffe bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2478) in der Druckpyrolyseanlage (Fallrohrbetrieb) bei 800 °C (Körnung: 0,2…0,5 mm) 75

Abbildung 4-14: Einfluss des Systemdrucks auf die Zusammensetzung des Kokses (Immediatanalyse) bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2478) in der Druckpyrolyseanlage (Fallrohrbetrieb) bei 800 °C (Körnung: 0,2…0,5 mm) *(Legende: ausgefüllte Symbole: Koks aus Reaktionsrohr, umrandete Symbole: Koks aus Koksauffangbehälter)* 76

Abbildung 4-15: Einfluss des Systemdrucks auf die Produktverteilung bei der Pyrolyse von Weizenstroh (2296) in der Druckpyrolyseanlage (Fallrohrbetrieb) bei 800 °C (Körnung: 0,2…0,5 mm) *(Legende:*

ausgefüllte Symbole: Koks aus Reaktionsrohr, umrandete Symbole: Koks aus Koksauffangbehälter) 78

Abbildung 4-16: Einfluss des Systemdrucks auf die Gasausbeute und die Ausbeute der Hauptgaskomponenten bei der Pyrolyse von Weizenstroh (2296) in der Druckpyrolyseanlage (Fallrohrbetrieb) bei 800 °C (Körnung: 0,2…0,5 mm)..... 79

Abbildung 4-17: Einfluss des Systemdrucks auf die Ausbeute der C2- und C3-Kohlenwasserstoffe bei der Pyrolyse von Weizenstroh (2296) in der Druckpyrolyseanlage (Fallrohrbetrieb) bei 800 °C (Körnung: 0,2…0,5 mm) 79

Abbildung 4-18: Einfluss des Systemdrucks auf die Zusammensetzung des Kokses (Immediatanalyse) bei der Pyrolyse von Weizenstroh (2296) in der Druckpyrolyseanlage (Fallrohrbetrieb) bei 800 °C (Körnung: 0,2…0,5 mm) *(Legende: ausgefüllte Symbole: Koks aus Reaktionsrohr, umrandete Symbole: Koks aus Koksauffangbehälter)* 80

Abbildung 4-19: Einfluss der Aufheizgeschwindigkeit auf die Morphologie des Kokses bei der Pyrolyse von Weizenstroh (2275) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm)..... 82

Abbildung 4-20: Einfluss der Aufheizgeschwindigkeit auf die Produktausbeuten bei der Pyrolyse von Weizenstroh (2275) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm)..... 82

Abbildung 4-21: Einfluss der Aufheizgeschwindigkeit auf die Produktausbeuten bei der Pyrolyse von Weizenstroh (2275) bei 400 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm)..... 83

Abbildung 4-22: Einfluss der Aufheizgeschwindigkeit auf die Ausbeute der Hauptgaskomponenten bei der Pyrolyse von Weizenstroh (2275) bei 400 und 500 °C im Festbettreaktor *(Legende: 400 °C … Symbole mit Umrandung; 500 °C … ausgefüllte Symbole)*..... 84

Abbildung 4-23: Einfluss der Aufheizgeschwindigkeit auf die Ausbeute der gasförmigen Kohlenwasserstoffe bei der Pyrolyse von Weizenstroh (2275) bei 400 und 500 °C im Festbettreaktor *(Legende: 400 °C … Symbole mit Umrandung; 500 °C … ausgefüllte Symbole)* 84

Abbildung 4-24: Einfluss der Aufheizgeschwindigkeit auf die Immediatanalyse des Kokses bei der Pyrolyse von Weizenstroh (2275) bei 400 und 500 °C im Festbettreaktor *(Legende: 400 °C … Symbole mit Umrandung; 500 °C … ausgefüllte Symbole)* 85

Abbildung 4-25: Einfluss der Aufheizgeschwindigkeit auf die Elementarzusammensetzung des Kokses bei der Pyrolyse von Weizenstroh (2275) bei 400 und 500 °C im Festbettreaktor *(Legende: 400 °C … Symbole mit Umrandung; 500 °C … ausgefüllte Symbole)* 86

Abbildung 4-26: Einfluss der Aufheizgeschwindigkeit auf die Teer/Öl-Zusammensetzung bei der Pyrolyse von Weizenstroh (2275) bei 400 und 500 °C im Festbettreaktor *(Legende: 400 °C … Symbole mit Umrandung; 500 °C … ausgefüllte Symbole)* 86

Abbildung 4-27: Einfluss der Aufheizgeschwindigkeit auf die Energieverteilung bei der Pyrolyse von Weizenstroh (2275) bei 500 °C im Festbettreaktor 87

Abbildung 4-28: Einfluss der Verweilzeit bei Endtemperatur für die Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 380 und 550 °C (Festbett, Schnellaufheizung) 90

Abbildung 4-29: Einfluss der Verweilzeit auf die Ausbeuten ausgewählter Gaskomponenten für die Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 380 und 550 °C (Festbett, Schnellaufheizung) 91

Abbildung 4-30: Einfluss der Verweilzeit auf die Zusammensetzung des Kokses bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 380 und 550 °C (Festbett, Schnellaufheizung) 92

Abbildung 4-31: Einfluss der Verweilzeit auf die Energieinhalte der Produkte und die „Reaktionsenthalpie“ bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 380 und 550 °C (Festbett, Schnellaufheizung) 93

Abbildung 4-32: Einfluss der Partikelgröße auf die Produktverteilung bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 500 °C (Schnellaufheizung) 94

Abbildung 4-33: Produktverteilung in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis bei der Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) und Weizenstroh (2275) im Festbett bei 500 °C mit Schnellaufheizung *(gestrichelte Linien … über Mischungsregel berechnete Ausbeuten)* 96

Abbildung 4-34: Ausbeuten der Hauptgaskomponenten in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis bei der Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) und Weizenstroh (2275) im Festbett bei 500 °C mit Schnellaufheizung *(gestrichelte Linien … über Mischungsregel berechnete Ausbeuten)* 97

Abbildung 4-35: Ausbeuten der C2 und C3-Kohlenwasserstoffe in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis bei der Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) und Weizenstroh (2275) im Festbett bei 500 °C mit Schnellaufheizung *(gestrichelte Linien … über Mischungsregel berechnete Ausbeuten)* 97

Abbildung 4-36: Abweichung der experimentell bestimmten Brennwerte (exp) von den mit der Mischungsregel berechneten Werten (MR) in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis bei der Pyrolyse von

Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) und Weizenstroh (2275) im Festbett bei 500 °C mit Schnellaufheizung 98

Abbildung 4-37: Einfluss der Temperatur auf die Morphologie des Kokses bei der Pyrolyse von Xylan (2664) (Körnung: < 2 mm, Festbett, Schnellaufheizung) 102

Abbildung 4-38: Einfluss der Temperatur auf die Morphologie des Kokses bei der Pyrolyse von Fichtesulfitzellstoff (2621) (Körnung: < 2 mm, Festbett, Schnellaufheizung) 102

Abbildung 4-39: Einfluss der Temperatur auf die Morphologie des Kokses bei der Pyrolyse von Alkali-Lignin (2665) (Körnung: < 2 mm, Festbett, Schnellaufheizung) 103

Abbildung 4-40: Koksausbeute bei der Pyrolyse der Biopolymere in Abhängigkeit von der Pyrolysetemperatur (Festbett, Schnellaufheizung, Körnung: < 2 mm) 103

Abbildung 4-41: Teer/Öl- und Zersetzungswasserausbeute bei der Pyrolyse der Biopolymere in Abhängigkeit von der Pyrolysetemperatur (Festbett, Schnellaufheizung, Körnung: < 2 mm)..... 105

Abbildung 4-42: Gasausbeute bei der Pyrolyse der Biopolymere in Abhängigkeit von der Pyrolysetemperatur (Festbett, Schnellaufheizung, Körnung: < 2 mm) 106

Abbildung 4-43: Entbundene Volumenanteile an Kohlenmonoxid und Kohlendioxid im Gas bei der Pyrolyse der Biopolymere in Abhängigkeit von der Pyrolysetemperatur (Festbett, Schnellaufheizung, Körnung: < 2 mm)..... 107

Abbildung 4-44: Entbundene Volumenanteile an Wasserstoff und Methan im Gas bei der Pyrolyse der Biopolymere in Abhängigkeit von der Pyrolysetemperatur (Festbett, Schnellaufheizung, Körnung: < 2 mm)..... 107

Abbildung 4-45: Flüchtigengehalt im Koks bei der Pyrolyse der Biopolymere in Abhängigkeit von der Pyrolysetemperatur (Festbett, Schnellaufheizung, Körnung: < 2 mm)..... 108

Abbildung 4-46: „Reaktionsenthalpie“ bei der Pyrolyse der Biopolymere in Abhängigkeit von der Pyrolysetemperatur (Festbett, Schnellaufheizung, Körnung: < 2 mm)..... 111

Abbildung 4-47: Produktverteilung bei der Pyrolyse von Maissilage (2475) in Abhängigkeit von der Temperatur im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 113

Abbildung 4-48: Morphologie des Kokse aus der Pyrolyse von Maissilage (2475) im Festbettreaktor bei verschiedenen Aufheizgeschwindigkeiten. 114

Abbildung 4-49: Ausbeuten an Koks, Kondensat und Gas bei der Biomassepyrolyse bei 500 °C in Abhängigkeit des Gehaltes an

flüchtigen Bestandteilen im Einsatzstoff (Bedingungen: Festbett, Schnellaufheizung, Körnung < 2 mm) 115

Abbildung 4-50: Kohlenstoff- und Sauerstoffgehalt im Teer/Öl bei der Biomassepyrolyse bei 500 °C in Abhängigkeit des Gehaltes an flüchtigen Bestandteilen im Einsatzstoff (Bedingungen: Festbett, Schnellaufheizung, Körnung < 2 mm) 116

Abbildung 4-51: Anteile der Hauptkomponenten im Gas bei der Biomassepyrolyse bei 500 °C in Abhängigkeit des Gehaltes an flüchtigen Bestandteilen im Einsatzstoff (Bedingungen: Festbett, Schnellaufheizung, Körnung < 2 mm) 117

Abbildung 4-52: Produktverteilung bei der Pyrolyse von Weizenstroh (2275) und Weizenstroh (grau, 2297) in Abhängigkeit von der Temperatur im Festbettreaktor *(ausgefüllte Zeichen: Weizenstroh (2275); umrandete Zeichen: Weizenstroh (grau, 2297))* 118

Abbildung 4-53: Ausbeuten der Hauptgaskomponenten bei der Pyrolyse von Weizenstroh (2275) und Weizenstroh (grau, 2297) in Abhängigkeit von der Temperatur im Festbettreaktor *(durchgezogene Linie: Weizenstroh (2275); gestrichelte Linie: Weizenstroh (grau, 2297))* 119

Abbildung 4-54: Ausbeuten der C2- und C3-Kohlenwasserstoffe bei der Pyrolyse von Weizenstroh (2275) und Weizenstroh (grau, 2297) in Abhängigkeit von der Temperatur im Festbettreaktor *(durchgezogene Linie: Weizenstroh (2275); gestrichelte Linie: Weizenstroh (grau, 2297))* 120

Abbildung 4-55: Differenz zwischen Brennwert der Produkte und dem Einsatzstoff bei der Pyrolyse von Weizenstroh (2275) und Weizenstroh (grau, 2297) in Abhängigkeit von der Temperatur im Festbettreaktor *(durchgezogene Linie: Weizenstroh (2275); gestrichelte Linie: Weizenstroh (grau, 2297))* 121

Abbildung 4-56: Einfluss der Aufheizgeschwindigkeit bei der Zersetzung von Calciumoxalat unter Stickstoffatmosphäre (Gerät: TG-DSC Netzsch STA 409) 124

Abbildung 4-57: Einfluss von Aufheizgeschwindigkeit und der Partikelgröße auf die Reaktionsenthalpie bei der Pyrolyse von Weizenstroh (2275) (Gerät: TG-DSC Netzsch STA 409) 124

Abbildung 4-58: DSC-Signale der holzartigen Biomassen bei einer Aufheizrate von 20 K/min (Gerät: Netzsch STA 409 C, Endtemperatur: 1.300 °C, Körnung: < 2 mm) 127

Abbildung 4-59: DSC-Signale der halmgutartigen Biomassen bei einer Aufheizrate von 20 K/min (Gerät: Netzsch STA 409 C, Endtemperatur: 1.300 °C, Körnung: < 2 mm) 127

Abbildung 4-60: DSC-Signale der Biopolymere bei einer Aufheizrate von 20 K/min (Gerät: Netzsch STA 409 C, Endtemperatur: 1.300 °C, Körnung: Pulver) 129

Abbildung 4-61: Mittels Differential-Scanning-Kalorimetrie bestimmte „Reaktionsenthalpien der Pyrolyse“ verschiedener Biomassen 130

Abbildung 4-62: Ergebnisse der thermogravimetichen Untersuchungen zum Einfluss der Aufheizgeschwindigkeit auf die Pyrolyse von Maissilage (2475) (10 bar, Stickstoffatmosphäre, < 2 mm; Gerät: HP-TGA DMT) 131

Abbildung 4-63: Ergebnisse der thermogravimetrischen Untersuchungen zum Druckeinfluss auf die Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte, rindenfrei) (10 K/min, Stickstoffatmosphäre, < 2 mm; Gerät: HP-TGA DMT) 132

Abbildung 4-64: Ergebnisse der thermogravimetrischen Untersuchungen zum Druckeinfluss auf die Pyrolyse von Pappel (Kurzumtrieb) (10 K/min, Stickstoffatmosphäre, < 2 mm; Gerät: HP-TGA DMT) 133

Abbildung 4-65: Ergebnisse der thermogravimetrischen Untersuchungen zum Druckeinfluss auf die Pyrolyse von Rapsstroh (10 K/min, Stickstoffatmosphäre, < 2 mm; Gerät: HP-TGA DMT) 134

Abbildung 4-66: Ergebnisse der thermogravimetrischen Untersuchungen zum Druckeinfluss auf die Pyrolyse von Triticale-Ganzpflanze (10 K/min, Stickstoffatmosphäre, < 2 mm; Gerät: HP-TGA DMT) 135

Abbildung 4-67: Ausschnitt aus dem Gesamtformular der Datenbank, Registerkarte „Rohstoff, Bedingungen, Ausbeuten“ 137

Abbildung 4-68: Ausschnitt der Benutzeroberfläche des Formulars „Rohstoff_Bedingungen_Ausbeuten“ 138

Abbildung 4-69: Benutzeroberfläche des Formulars „Elemente- und Energieverteilung“ 139

Abbildung 4-70: Menü der in die Datenbank „Biomassepyrolyse“ erstellten Access-Objekte 140

Abbildung 4-71: Schematische Darstellung des in ASPENplus™ erstellten Pyrolysemodells 143

Abbildung 4-72: Output der Modellierung für die Pyrolyse von Triticale-Ganzpflanze bei 600 °C und Schnellaufheizung 147

Abbildung 4-73: Datenauswahlwerkzeug unter der Benutzeroberfläche von MS Excel 2007 148

Abbildung 4-74: Eingabemenü der Registerkarte „Temperatur“ 149

Abbildung 4-75: Input und Outputdaten der Massebilanz 149

Abbildung 4-76: Output Pyrolyseprodukte 150

Abbildung 4-77: Outputdaten zur Energiebilanz 150

Abbildung 4-78: Bilanz der chemisch gebundenen Energien auf Basis des Heizwertes für die Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 500 °C 151

Abbildung 4-79: Mittels ASPENplus^{TM} berechnete Energiebilanz für die Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 500 °C 152

Abbildung 4-80: In ASPENplus^{TM} berechnete Energiebilanz für die Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) – Datenbasis Pyrolyse im Festbettreaktor, Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung 153

Abbildung 4-81: Differenz zwischen Output und Input (Energiebilanz; Berechnungsergebnisse ASPENplus^{TM}) für die holz- und halmgutartigen Biomassen 153

Abbildung 4-82: Differenz zwischen Output und Input (Energiebilanz; Berechnungsergebnisse ASPENplus^{TM}) für die Silagen und Triticale-Ganzpflanze 154

Abbildung 4-83: In ASPENplus^{TM} berechnete Energiebilanz für die Pyrolyse von Weizenstroh (2275) – Datenbasis Pyrolyse im Festbettreaktor, Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung 155

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Übersicht zu den im Rahmen des Projektes verwendeten holzartigen Biomassen 17

Tabelle 3-2: Übersicht zu den im Rahmen des Projektes verwendeten halmgutartigen Biomassen 18

Tabelle 3-3: Übersicht zu den im Rahmen des Projektes verwendeten Biopolymeren 18

Tabelle 3-4: Ergebnisse der allgemeinen brennstofftechnischen Untersuchungen für die holzartigen Biomassen und die Biopolymere 22

Tabelle 3-5: Ergebnisse der allgemeinen brennstofftechnischen Untersuchungen für die landwirtschaftlichen Biomassen 23

Tabelle 3-6: Ergebnisse der Stoffgruppenbestimmung für verschiedene Biomassen 26

Tabelle 3-7: Stoffgruppenzusammensetzung verschiedener Biomassen 27

Tabelle 3-8: Literaturwerte für die Stoffgruppenzusammensetzung von Fichtenholz, Buchenholz und Weizenstroh 28

Tabelle 3-9: Literaturwerte für die Stoffgruppenzusammensetzung verschiedener halmgutartiger Biomassen und von Pappel 28

Tabelle 3-10: Bewertung der Reaktorprinzipien hinsichtlich der gestellten Anforderungen an die Versuchsanlage zur Biomassepyrolyse 36

Tabelle 3-11: Anlagen- und Einsatzstoffparameter für die Festbettlaborpyrolyseanlage 38

Tabelle 3-12: Charakteristika der Druckpyrolyseanlage (DPA) 47

Tabelle 3-13: Anlagenspezifika der verwendeten thermoanalytischen Messgeräte und Versuchsbedingungen 48

Tabelle 4-1: Relative Standardabweichungen der Produktausbeuten 59

Tabelle 4-2: Relative Standardabweichungen der Produktzusammensetzungen und Energieinhalte 60

Tabelle 4-3: Relative Standardabweichungen der Pyrolysegaszusammensetzung und der Ausbeuten der Gaskomponenten 60

Tabelle 4-4: Einfluss verschiedener Biomassemischungen auf die Produktverteilung bei der Pyrolyse *(Pyrolysebedingungen: Festbett, 500 °C, Schnellaufheizung);* Abweichung zum additiven Verhalten (MR) 99

Tabelle 4-5: Einfluss verschiedener Biomassemischungen auf die Ausbeute der Gaskomponenten bei der Pyrolyse *(Pyrolysebedingungen: Festbett, 500 °C, Schnellaufheizung);* Abweichung zum additiven Verhalten (MR) 100

Tabelle 4-6: Einfluss verschiedener Biomassemischungen auf die Zusammensetzung der Pyrolyseprodukte *(Pyrolysebedingungen: Festbett, 500 °C, Schnellaufheizung);* Abweichung zum additiven Verhalten (MR) 100

Tabelle 4-7: Einfluss verschiedener Biomassemischungen auf den Brennwert der Pyrolyseprodukte *(Pyrolysebedingungen: Festbett, 500 °C, Schnellaufheizung);* Abweichung zum additiven Verhalten (MR) 100

Tabelle 4-8: Reaktionsenthalpie bei der Pyrolyse von Weizenstroh (2275, Körnung: < 2 mm) für verschiedene Einwaagen (Gerät: TG-DSC Netzsch STA 409; Aufheizrate: 20 K/min) 125

Tabelle 4-9: Reaktionsenthalpie bei der Pyrolyse von Weizenstroh (2275, Körnung: < 2 mm) mit und ohne Deckel (Gerät: TG-DSC Netzsch STA 409; Aufheizrate: 20 K/min) 126

Tabelle 4-10: Vorgabe der Reaktionsprodukte für die Pyrolysegasbildung 144

Tabelle 4-11: Reaktionsgleichung der Gleichgewichtsreaktionen 144

Tabelle 4-12: In das Pyrolysemodell implementierte Versuchspunkte für die Variation der Pyrolysetemperatur bei Schnellaufheizung 145

Tabelle 4-13: In das Pyrolysemodell implementierte Versuchspunkte für die Variation der Aufheizrate bei Pyrolysetemperaturen von 400 bzw. 500 °C 146

Literaturverzeichnis

/Aguado2000/ Aguado, R.; Olazar, M.; San José, M. J.; Aguirre, G.; Bilbao, J.: *Pyrolysis of sawdust in a conical spouted bed reactor. Yields and product composition.* In: Industrial Engineering Chemistry Research (2000), 39, S. 1925-1933

/Aguiar2008/ Aguiar, L.; Márquez-Montesino, F.; Gonzalo, A.; Sánchez, J. L.; Arauzo, J.: *Influence of temperature and particle size on the fixed bed pyrolysis of orange peel residues.* In: Journal of Analytical and Applied Pyrolysis (2008), 83, S. 124-130

/Aho2007/ Aho, A.; Kumar, N.; Eränen, K.; Salmi, T.; Hupa, M.; Murzin, D. Y.: *Catalytic pyrolysis of biomass in a fluidized bed reactor: Influence of acidity of H-Beta zeolite.* In: Institution of Chemical Engineers (2007), 85, S. 473-480

/Asadullah2009/ Asadullah, M.; Zhang, S.; Li, C.-Z.: *Evaluation of structural features of chars from pyrolysis of biomass of different particle sizes.* In: Fuel Processing Technology (2009), 91, S. 877-881

/Ates2006/ Ate, F.; Pütün, A. E.; Pütün, E.: *Pyrolysis of two different biomass samples in a fixed-bed reactor combined with two different catalysts.* In: Fuel (2006), 85, S. 1851-1859

/Bayerbach2006/ Bayerbach, R.: *Über die Struktur der oligomeren Bestandteile von Flash-Pyrolyseölen aus Biomasse.* Dissertation Universität Hamburg, Hamburg 2006

/Cetin2004/ Cetin, E.; Moghtaderi, B.; Gupta, R.; Wall, T. F.: *Influence of pyrolysis conditions on the structure and gasification reactivity of biomass chars.* In: Fuel (2004), 83, S. 2139-2150

/Demirbas2006/ Demirbas, A.: *Production and characterisation of bio-chars from biomass via pyrolysis.* In: Energy Sources. Part A (2006), 28, S. 413-4

/DiBlasi2000/ Di Blasi, C.; Branca, C.; D'Errico, G.: *Degradation characteristics of straw and washed straw.* In: Thermochimica Acta (2000), 364, S. 133-142

/DiBlasi2010/ DiBlasi, C.; Branca, C.; Galgano, A.: *Biomass Screening for the Production of Furfural via Thermal Decomposition.* In: Industrial Engineering Chemistry Research (2010), 49, S. 2658-2671

/DIN 51857/ DIN 51857 März 1997: *Berechnung von Brennwert, Heizwert, Dichte, relativer Dichte und Wobbeindex von Gasen und Gasgemischen.*

/DIN 1871/ DIN 1871 Mai 1999: *Gasförmige Brennstoffe und sonstige Gase.*

/Evans/ Evans, R. J.; Milne, T. A.; Soltys, M. N.: *Direct mass-spectrometric Studies of the pyrolysis of carbonaceous fuels.* In: Journal of Analytical and Applied Pyrolysis (1986), 9, S. 207-236

/Fahl 2010/ Fahl, U.; Blesl, M.; Thöne, E.: *Energiewirtschaftliche Gesamtsituation*, In.: BWK – Das Energiefachmagazin (2010), 62, Nr. 4, S. 42-56

/Fengel1983/ Fengel, D.; Wegener, G.: *Wood Chemistry, Ultrastructures, Reactions*. Walter de Gruyter: Berlin 1983

/Fengel2003/ Fengel, D.; Wegener, G.: Wood – Chemistry, Ultrastructure, Reactions. Kessel Verlag Remagen, 2003, ISBN: 3935638-39-6

/FNR 2005/ Fachagentur nachwachsende Rohstoffe e. V. (Hrsg.): *Leitfaden Bioenergie – Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen.* FNR: Gülzow (2005). ISBN: 3-00-015389-6

/Funazukuri1986/ Funazukuri, T.; Hudgins, R. R.; Silveston, P. L.: *Product distribution in pyrolysis of cellulose in a microfluidized bed.* In: Journal of Analytical and Applied Pyrolysis (1986), 9, S. 139-158

/Haykiri-Acma2006/ Haykiri-Acma, H.: *The role of particle size in the non-isothermal pyrolysis of hazelnut shell.* In: Journal of Analytical and Applied Pyrolysis (2006), 75, S. 211-216

/Horne1996/ Horne, P. A.; Williams, P. T.: *Influence of temperature on the products from the flash pyrolysis in biomass.* In: Fuel (1996), 75, S. 1051-1059

/Jensen1998/ Jensen, A.; Dam-Johansen, K.; Wojtowicz, M. A.; Serio, M. A.: *TG-FTIR study of the influence of potassium chloride on wheat straw pyrolysis.* In: Energy & Fuels (1998), 12, S. 929-938

/Kai1991/ Kay, Y.: *Chemistry of Extractives.* In: Hon, D.; Shiraishi, N. (Hrsg.) Wood and Cellulosic Chemistry. 1. Auflage (1991), New York: Marcel Dekker Inc., S. 215-255; ISBN: 0-8247-8304-2

/Kaltschmitt2009/ Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.; Hofbauer, H. (Hrsg.): Energie *aus Biomasse – Grundlagen, Technik und Verfahren.* 2. neu überarbeitete Auflage Dordrecht, Heidelberg, Hamburg, New York: Springer Verlag, ISBN: 978-3-540-85094-6

/Kaminsky1989/ Kaminsky, W.: *Pyrolyse von Biomasse.* In: Chemie-Ingenieur-Technik (1989), 61, S. 775-782

/Khezami2005/ Khezami, L.; Chetouani, A.; Taouk, B.; Capart, R.: *Production and characterisation of activated carbon from wood components in powder: Cellulose, lignin, xylan.* In: Powder Technology (2005), 157, S. 48-56

/Li2004/ Li, S.; Xu, S.; Liu, S.; Yang, C.; Lu, Q.: *Fast pyrolysis of biomass in free-fall reactor for hydrogen-rich gas.* In: Fuel Processing Technology (2004), 85, S. 1201-1211

/Lee2005/ Lee, K.-H.; Kang, B.-S.; Park, Y.-K.; Kim, J.-S.: *Influence of reaction temperature, pretreatment, and a char removal system on the production of bio-oil from rice straw by fast pyrolysis, using a fluidized bed.* In: Energy & Fuels (2005), 19, S. 2179-2184

/Lenz 2010/ Lenz, V.; Schwenker, A.; Hoffmann, F.; Kaltschmitt, M.: *Erneuerbare Energien*, In.: BWK – Das Energiefachmagazin (2010), 62, Nr. 4, S.80-94

/Letho2007/ Lehto, J.: *Determination of kinetic parameters for Finnish milled peat using drop tube reactor and optical measurement techniques.* In: Fuel (2007), 86, S. 1656-1663

/McKendry2002/ McKendry, P.: *Energy production from biomass (part 1): overview of biomass.* In: Bioresource Technology (2002), 83, S. 37-46

/Milosavljevic1996/ Milosavljevic, I.; Oja, V.; Suuberg, E. M.: *Thermal effects in cellulose pyrolysis: Relationship to char formation processes.* In: Industrial Engineering Chemistry Research (1996), 35, S. 653-662

/Mohan2006/ Mohan, D.; Pittman Jr., C. U.; Steele, P. H.: *Pyrolysis of wood/ biomass for bio-oil production: A critical review.* In: Energy & Fuels (2006), 20, S. 848-889

/Mok1983/ Mok, W. S.-L.; Antal, M. J.: *Effects of pressure on biomass pyrolysis: heats of reaction of cellulose pyrolysis.* In: Thermochimica Acta (1983), 68, S. 165-186

/Müller-Hagedorn2007/ Müller-Hagedorn, M.; Bockhorn, H.: *Pyrolytic behaviour of different biomasses (angiosperms) (maize plants, straws and wood) in low temperature pyrolysis.* In: Journal of Analytical and Applied Pyrolysis (2007), 79, S. 136-146

/Onay2006/ Onay, Ö.; Koçkar, Ö. M.: *Pyrolysis of rapeseed in a free fall reactor for production of bio-oil.* In: Fuel (2006), 85, S. 1921-1928

/Onay2004/ Onay, Ö.; Koçkar, Ö. M.: *Fixed-bed pyrolysis of rapeseed (Brassica napus L.).* In: Biomass and Bioenergy (2004), 26, S. 289-299

/Onay2004a/ Onay, Ö.; Beis, S. H.; Koçkar, Ö. M.: *Pyrolysis of walnut shell in a well-swept fixed-bed reactor.* In: Energy Sources (2004), 26, S. 771-782

/Otake1993/ Otake, Y.; Walker, P. L.: *Pyrolysis of demineralised and metal cation loaded lignites.* In: Fuel 72 (1993), S. 139-149

/Pettersen1984/ Pettersen, R. C.: *The chemical composition of wood.* American Chemical Society (1984)

/Prey1977/ Prey, V.; Eichberger, W.; Gruber, H.: *Die thermische Zersetzung von D-Glucose Teil 1.* In: Die Stärke (1977), 2, S. 60-65

/Rath2003/ Rath, J.; Wolfinger, M. G.; Steiner, G.; Krammer, G.; Barontini, F.; Cozzani, V.: *Heat of wood pyrolysis.* In: Fuel (2003), 82, S. 81-91

/Raveendran1996/ Raveendran, K.; Ganesh, A.; Khilar, K. C.: *Pyrolysis characteristics of biomass and biomass components.* In: Fuel (1996), 75, S. 987-998

/Raveendran1995/ Raveendran, K.; Ganesh, A.; Khilar, K. C.: *Influence of mineral matter on biomass pyrolysis characteristics.* In: Fuel (1995), 74, S. 1812-1822

/Reichel2007/ Reichel, D.; Krzack, S.; Meyer, B.: Mechanismen und Reaktionen bei der Pyrolyse von Biomasse. In: Gülzower Fachgespräche (2007), 28, S. 30-53

/Rowell2005/ Rowell, R. M.; Pettersen, R.; Han, J. S.; Tshabalala, M. A.: *Cell Wall Chemistry.* In: Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites. Singapore, Boca Raton, London, New York: Taylor & Francis Group. ISBN: 0-8493-1588-3

/Shen2009/ Shen, J.; Wang, X.-S.; Garcia-Perez, M.; Mourant, D.; Rhodes, M. J.; Li, C.-Z.: Effects of particle size on the fast pyrolysis of oil mallee woody biomass. In: Fuel (2009), 88, S. 1810-1817

/Steinberg1985/ Steinberg, M.; Fallon, P. T.; Sundaram, M. S.: *Flash pyrolysis of biomass with reactive and non-reactive gas.* In: Biomass (1986), 9, S. 293-315

/Vetter1995/ Maier, J; Vetter, R.; Siegle, V.; Spliethoff, H.: *Alternative Kulturen, Nachwachsende Rohstoffe: Anbau von Energiepflanzen zur Ganzpflanzengewinnung mit verschiedenen Beerntungsmethoden; Schwachholzverwertung.* Abschlussbericht ITADA-Projekt 10 (1995). IfuL Mühlheim, Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen, Universität Stuttgart

/Wang2005/ Wang, S.; Fang, M.; Yu, C.; Luo, Z.; Cen, K.: *Flash pyrolysis of biomass particles in fluidized bed for bio-oil production.* In: China Particuology (2005), 3, S. 136-140

/Westerhof2007/ Westerhof, R. J.M.; Kuipers, N. J. M.; Kersten, S. R. A.; van Swaaij, W. P. M.: *Controlling the water content of biomass fast pyrolysis oil.* In: Industrial Engineering Chemistry Research (2007), 46, S. 9238-9247

/Xianwen2000/ Xianwen, D.; Chuangzhi, W.; Haibin, L.; Yong, C.: *The fast pyrolysis of biomass in CFB reactor.* In: Energy & Fuels (2000), 14, S. 552-557

/Yang2007/ Yang, H.; Yan, R.; Chen, H.; Lee, D. H.; Zheng, C.: *Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis.* In: Fuel (2010), 86, S. 1781-1788

/Zanzi2002/ Zanzi, R.; Sjöstrom, K.; Björnbom, E.: *Rapid pyrolysis of agricultural residues at high temperature.* In: Biomass and Bioenergy (2002), 23, S. 357-366

/Zhang2006/ Zhang, Y.; Kajitani, S.; Ashizawa, M.; Miura, K.: *Peculiarities of rapid pyrolysis of biomass covering medium- and high temperature ranges.* In: Energy & Fuels (2006), 20, S. 2705-2712

TECHNISCHE UNIVERSITÄT
BERGAKADEMIE FREIBERG

Institut für
Energieverfahrenstechnik
und Chemieingenieurwesen

Reiche Zeche • 09596 Freiberg • Tel. Sekretariat 03731/39-4511 • Fax 03731/39-4555 •
E-Mail evt@iec.tu-freiberg.de

Anhang

zum Abschlussbericht

Ermittlung konsistenter Stoffdaten zur Biomassepyrolyse im Hinblick auf die Validierung, Auslegung und den Betrieb labor-, kleintechnischer und technischer Vergasungsanlagen

Kurztitel: Stoffdaten Biomassepyrolyse

Gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV)

FKZ: 22016006

Anhang

Abbildungsverzeichnis Anhang 3
Tabellenverzeichnis Anhang 6
Anhang A Brennstoffcharakterisierung 25
Anhang B Technische Ausrüstung 30
Anhang C Vorgehensweise und Versuchspläne 33
Anhang D Ergebnisse zum Einfluss der Temperatur auf die Biomassepyrolyse .. 39
Anhang E Ergebnisse zum Einfluss des Systemdrucks auf die Biomassepyrolyse 110
Anhang F Ergebnisse zum Einfluss der Aufheizgeschwindigkeit auf die Biomassepyrolyse 116
Anhang G Ergebnisse zum Einfluss der Verweilzeit bei Endtemperatur bei der Biomassepyrolyse 138
Anhang H Ergebnisse zum Einfluss der Brennstoffvorbereitung bei der Biomassepyrolyse 144
Anhang I Ergebnisse zur Pyrolyse von Biomassemischungen 150
Anhang J Ergebnisse zur Pyrolyse von Hemicellulose, Cellulose und Lignin 176
Anhang K Ergebnisse der thermogravimetrischen Untersuchungen 194
Anhang L Datenbank 205
Anhang M Ergebnisse der Modellierung mit AspenPlus™ 207

Abbildungsverzeichnis Anhang

Abb Anhang B - 1: Bedienoberfläche der Prozesssoftware an der Druckpyrolyseanlage....30

Abb Anhang B - 2: Aufbau der Netzsch STA 409 C (TG-DSC)....31

Abb Anhang B - 3: Hochdruckthermowaage (HP-TG) der Fa. DMT 32

Abb Anhang E - 1: Einfluss des Systemdrucks auf die Elementarzusammensetzung des Kokses bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2478) in der Druckpyrolyseanlage (Fallrohrbetrieb) bei 800 °C (Körnung: 0,2…0,5 mm) *(Legende: ausgefüllte Symbole: Koks aus Reaktionsrohr, umrandete Symbole: Koks aus Koksauffangbehälter)*....110

Abb Anhang E - 2: Einfluss des Systemdrucks auf die Elementarzusammensetzung des Kokses bei der Pyrolyse von Weizenstroh (2296) Kokses in der Druckpyrolyseanlage (Fallrohrbetrieb) bei 800 °C (Körnung: 0,2…0,5 mm) *(Legende: ausgefüllte Symbole: Koks aus Reaktionsrohr, umrandete Symbole: Koks aus Koksauffangbehälter)*....111

Abb Anhang F - 1: Einfluss der Aufheizrate auf die Verteilung der chemisch gebundenen Energie des Einsatzstoffes auf die Produkte bei der Weizenstrohpyrolyse (2275) bei 400 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm)....116

Abb Anhang F - 2: Einfluss der Aufheizrate auf die Produktverteilung bei der Waldrestholzpyrolyse (2472) im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm) *(500 °C: volle Zeichen; 400 °C: umrandete Zeichen)*..122

Abb Anhang F - 3: Einfluss der Aufheizrate auf die Immediatanalyse des Kokses bei der Waldrestholzpyrolyse (2472) im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm) *(500 °C: volle Zeichen; 400 °C: umrandete Zeichen)*....122

Abb Anhang F - 4: Einfluss der Aufheizrate auf die Elementarzusammensetzung des Kokses bei der Waldrestholzpyrolyse (2472) im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm) *(500 °C: volle Zeichen; 400 °C: umrandete Zeichen)*....123

Abb Anhang F - 5: Einfluss der Aufheizrate auf die Ausbeuten der Hauptgaskomponenten bei der Waldrestholzpyrolyse (2472) im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm) *(500 °C: volle Zeichen; 400 °C: umrandete Zeichen)*....123

Abb Anhang F - 6: Einfluss der Aufheizrate auf die Ausbeuten an C2- und C3-Kohlenwasserstoffen bei der Waldrestholzpyrolyse (2472)

im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm) *(500 °C: volle Zeichen; 400 °C: umrandete Zeichen)* 124

Abb Anhang F - 7: Einfluss der Aufheizrate auf die Elementarzusammensetzung des Teer/Öl bei der Waldrestholzpyrolyse (2472) im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm) *(500 °C: volle Zeichen; 400 °C: umrandete Zeichen)* 124

Abb Anhang F - 8: Einfluss der Aufheizrate auf die Verteilung der chemisch gebundenen Energie des Einsatzstoffes auf die Produkte bei der Waldrestholzpyrolyse (2472) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm)..... 125

Abb Anhang F - 9: Einfluss der Aufheizrate auf die Verteilung der chemisch gebundenen Energie des Einsatzstoffes auf die Produkte bei der Waldrestholzpyrolyse (2472) bei 400 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm)..... 125

Abb Anhang K - 1: Einfluss der Einwaage auf die Reaktionsenthalpie bei der Zersetzung von Calciumoxalat unter Stickstoffatmosphäre (Gerät: TG-DSC Netzsch STA 409, 20 K/min) 194

Abb Anhang K - 2: Einfluss der Benutzung eines Deckels auf die Reaktionsenthalpie bei der Zersetzung von Calciumoxalat unter Stickstoffatmosphäre (Gerät: TG-DSC Netzsch STA 409, 20 K/min) 195

Abb Anhang K - 3: Ergebnisse der thermogravimetrischen Untersuchungen zum Einfluss der Aufheizrate auf die Pyrolyse von Maissilage (2475) (1 bar, Stickstoffatmosphäre, < 2 mm; Gerät: HP-TGA DMT)..... 197

Abb Anhang K - 4: Ergebnisse der thermogravimetrischen Untersuchungen zum Einfluss der Aufheizrate auf die Pyrolyse von Maissilage (2475) (30 bar, Stickstoffatmosphäre, < 2 mm; Gerät: HP-TGA DMT)..... 197

Abb Anhang K - 5: Ergebnisse der thermogravimetrischen Untersuchungen zum Druckeinfluss auf die Pyrolyse von Sägerestholz (Buche rindenfrei, 2309) (10 K/min, Stickstoffatmosphäre, < 2 mm; Gerät: HP-TGA DMT) 198

Abb Anhang K - 6: Ergebnisse der thermogravimetrischen Untersuchungen zum Druckeinfluss auf die Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) (10 K/min, Stickstoffatmosphäre, < 2 mm; Gerät: HP-TGA DMT) 198

Abb Anhang K - 7: Ergebnisse der thermogravimetrischen Untersuchungen zum Druckeinfluss auf die Pyrolyse von Weizenstroh (gelb, 2296) (10 K/min, Stickstoffatmosphäre, < 2 mm; Gerät: HP-TGA DMT) 199

Abb Anhang K - 8: Ergebnisse der thermogravimetrischen Untersuchungen zum Druckeinfluss auf die Pyrolyse von Weizenstroh (grau, 2297) (10 K/min, Stickstoffatmosphäre, < 2 mm; Gerät: HP-TGA DMT) 199

Abb Anhang K - 9: Ergebnisse der thermogravimetrischen Untersuchungen zum Druckeinfluss auf die Pyrolyse von Landschaftspflegeheu (2480) (10 K/min, Stickstoffatmosphäre, < 2 mm; Gerät: HP-TGA DMT).....200

Abb Anhang K - 10: Ergebnisse der thermogravimetrischen Untersuchungen zum Druckeinfluss auf die Pyrolyse von Roggenganzpflanzensilage (2473) (10 K/min, Stickstoffatmosphäre, < 2 mm; Gerät: HP-TGA DMT).....200

Abb Anhang K - 11: Ergebnisse der thermogravimetrischen Untersuchungen zum Druckeinfluss auf die Pyrolyse von Grünschnittroggensilage (2474) (10 K/min, Stickstoffatmosphäre, < 2 mm; Gerät: HP-TGA DMT).....201

Abb Anhang K - 12: Ergebnisse der thermogravimetrischen Untersuchungen zum Druckeinfluss auf die Pyrolyse von Maissilage (2475) (5 K/min, Stickstoffatmosphäre, < 2 mm; Gerät: HP-TGA DMT).....201

Abb Anhang K - 13: Ergebnisse der thermogravimetrischen Untersuchungen zum Druckeinfluss auf die Pyrolyse von Maissilage (2475) (10 K/min, Stickstoffatmosphäre, < 2 mm; Gerät: HP-TGA DMT) 202

Abb Anhang K - 14: Ergebnisse der thermogravimetrischen Untersuchungen zum Druckeinfluss auf die Pyrolyse von Maissilage (2475) (20 K/min, Stickstoffatmosphäre, < 2 mm; Gerät: HP-TGA DMT) 202

Abb Anhang L - 1: Ausschnitt aus der Registerkarte „Produktzusammensetzung“ in der Datenbank „Biomassepyrolyse“ 205

Abb Anhang L - 2: Ausschnitt aus der Registerkarte „Pyrolysegaszusammensetzung und -ausbeuten“ in der Datenbank „Biomassepyrolyse“ 206

Tabellenverzeichnis Anhang

Tab Anhang A - 1: Bestimmungsmethoden zu den Analysendaten aus den Datenbanken der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft 25

Tab Anhang A - 2: Vergleich von Analysendaten zur Brennstoffzusammensetzung mit Werten aus der Datenbank der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft 26

Tab Anhang A - 3: Mittels Röntgenfluoreszenz bestimmte Elementgehalte in den Aschen (550 °C) der holzartigen Biomassen..... 27

Tab Anhang A - 4: Mittels Röntgenfluoreszenz bestimmte Elementgehalte in den Aschen (550 °C) der halmgutartigen Biomassen 28

Tab Anhang A - 5: Verfahren zur Bestimmung der Biomassestoffgruppen..... 29

Tab Anhang C - 1: Stoffdaten der Gaskomponenten nach /DIN 51871/ und /DIN 1871/ 33

Tab Anhang C - 2: Versuchsplan zum Temperatureinfluss auf die Pyrolyse verschiedener Biomassen in der Laborpyrolyseanlage..... 34

Tab Anhang C - 3: Versuchsplan zum Einfluss des Drucks auf die Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2478) und Weizenstroh (2296) in der Fallrohrpyrolyseanlage bei 800 °C 35

Tab Anhang C - 4: Versuchsplan zum Einfluss der Aufheizgeschwindigkeit auf die Pyrolyse verschiedener Biomassen in der Laborpyrolyseanlage 35

Tab Anhang C - 5: Versuchsplan zum für die Pyrolyse von Biomassemischungen in der Laborpyrolyseanlage 35

Tab Anhang C - 6: Versuchsplan zum Druckeinfluss an der DMT-Hochdruckthermowaage..... 36

Tab Anhang C - 7: Versuchsplan für die Untersuchungen zur Reaktionsenthalpie bei der Pyrolyse mittels TG-DSC (Gerät: Netzsch STA 409 C)... 37

Tab Anhang C - 8: Ergebnisse der Korngrößenanalyse der Fraktion < 2 mm aus der Schneidmühle für die holzartigen Biomassen 38

Tab Anhang C - 9: Ergebnisse der Korngrößenanalyse der Fraktion < 2 mm aus der Schneidmühle für die halmgutartigen Biomassen 38

Tab Anhang C - 10: Ergebnisse der Korngrößenanalyse der Fraktion < 2 mm aus der Schneidmühle für die Silagen..... 38

Tab Anhang D - 1: Produktverteilung bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 39

Tab Anhang D - 2: Produktzusammensetzung bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung).....40

Tab Anhang D - 3: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff enthaltenen Elemente auf die Produkte bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung).....41

Tab Anhang D - 4: Energieinhalte der Produkte und „Reaktionsenthalpie“ bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung).....42

Tab Anhang D - 5: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff chemisch gebundenen Energie auf die Produkte bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung).....43

Tab Anhang D - 6: Gaszusammensetzung, Ausbeuten der Gaskomponenten und Gasdichte bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung).....44

Tab Anhang D - 7: Produktverteilung bei der Weizenstrohpyrolyse (2275) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung).....45

Tab Anhang D - 8: Produktzusammensetzung bei der Weizenstrohpyrolyse (2275) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung).....46

Tab Anhang D - 9: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff enthaltenen Elemente auf die Produkte bei der Pyrolyse von Weizenstrohpyrolyse (2275) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung).....47

Tab Anhang D - 10: Energieinhalte der Produkte und „Reaktionsenthalpie“ bei der Pyrolyse von Weizenstrohpyrolyse (2275) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung).....48

Tab Anhang D - 11: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff chemisch gebundenen Energie auf die Produkte bei der Weizenstrohpyrolyse (2275) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung).....49

Tab Anhang D - 12: Gaszusammensetzung, Ausbeuten der Gaskomponenten und Gasdichte bei der Weizenstrohpyrolyse (2275) für

verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 50

Tab Anhang D - 13: Produktverteilung bei der Waldrestholzpyrolyse für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 51

Tab Anhang D - 14: Produktzusammensetzung bei der Waldrestholzpyrolyse für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 52

Tab Anhang D - 15: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff enthaltenen Elemente auf die Produkte bei der Waldrestholzpyrolyse für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 53

Tab Anhang D - 16: Energieinhalte der Produkte und „Reaktionsenthalpie“ bei der Waldrestholzpyrolyse für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 54

Tab Anhang D - 17: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff chemisch gebundenen Energie auf die Produkte bei der Waldrestholzpyrolyse für verschiedene Temperaturen (Körnung: < 2 mm, Festbett, Schnellaufheizung) 54

Tab Anhang D - 18: Gaszusammensetzung, Ausbeuten der Gaskomponenten und Gasdichte bei der Waldrestholzpyrolyse für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 55

Tab Anhang D - 19: Produktverteilung bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Buche rindenfrei, 2309) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 56

Tab Anhang D - 20: Produktzusammensetzung bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Buche rindenfrei, 2309) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 57

Tab Anhang D - 21: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff enthaltenen Elemente auf die Produkte bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Buche rindenfrei, 2309) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 58

Tab Anhang D - 22: Energieinhalte der Produkte und „Reaktionsenthalpie“ bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Buche rindenfrei, 2309) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 59

Tab Anhang D - 23: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff chemisch gebundenen Energie auf die Produkte bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Buche rindenfrei, 2309) für verschiedene

Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung).....60

Tab Anhang D - 24: Gaszusammensetzung, Ausbeuten der Gaskomponenten und Gasdichte bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Buche rindenfrei, 2309) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung).....61

Tab Anhang D - 25: Produktverteilung bei der Pyrolyse von Pappel (Kurzumtrieb, 2469) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung).....62

Tab Anhang D - 26: Produktzusammensetzung bei der Pyrolyse von Pappel (Kurzumtrieb, 2469) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung).....63

Tab Anhang D - 27: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff enthaltenen Elemente auf die Produkte bei der Pyrolyse von Pappel (Kurzumtrieb, 2469) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung).....64

Tab Anhang D - 28: Energieinhalte der Produkte und „Reaktionsenthalpie“ bei der Pyrolyse von Pappel (Kurzumtrieb, 2469) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung).....65

Tab Anhang D - 29: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff chemisch gebundenen Energie auf die Produkte bei der Pyrolyse von Pappel (Kurzumtrieb, 2469) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung).....66

Tab Anhang D - 30: Gaszusammensetzung, Ausbeuten der Gaskomponenten und Gasdichte bei der Pyrolyse von Pappel (Kurzumtrieb, 2469) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung).....67

Tab Anhang D - 31: Produktverteilung bei der Pyrolyse von Weizenstroh, grau (2297) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung).....68

Tab Anhang D - 32: Produktzusammensetzung bei der Pyrolyse von Weizenstroh, grau (2297) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung).....69

Tab Anhang D - 33: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff enthaltenen Elemente auf die Produkte bei der Pyrolyse von Weizenstroh, grau (2297) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung).....70

Tab Anhang D - 34: Energieinhalte der Produkte und „Reaktionsenthalpie“ bei der Pyrolyse von Weizenstroh, grau (2297) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung).....71

Tab Anhang D - 35: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff chemisch gebundenen Energie auf die Produkte bei der Pyrolyse von Weizenstroh, grau (2297) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 72

Tab Anhang D - 36: Gaszusammensetzung, Ausbeuten der Gaskomponenten und Gasdichte bei der Pyrolyse von Weizenstroh, grau (2297) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 73

Tab Anhang D - 37: Produktverteilung bei der Pyrolyse von Rapsstroh (2386) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 74

Tab Anhang D - 38: Produktzusammensetzung bei der Pyrolyse von Rapsstroh (2386) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 75

Tab Anhang D - 39: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff enthaltenen Elemente auf die Produkte bei der Pyrolyse von Rapsstroh (2386) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 76

Tab Anhang D - 40: Energieinhalte der Produkte und „Reaktionsenthalpie“ bei der Pyrolyse von Rapsstroh (2386) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 77

Tab Anhang D - 41: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff chemisch gebundenen Energie auf die Produkte bei der Pyrolyse von Rapsstroh (2386) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 78

Tab Anhang D - 42: Gaszusammensetzung, Ausbeuten der Gaskomponenten und Gasdichte bei der Pyrolyse von Rapsstroh (2386) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 79

Tab Anhang D - 43: Produktverteilung bei der Pyrolyse von Landschaftspflegeheu (2480) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 80

Tab Anhang D - 44: Produktzusammensetzung bei der Pyrolyse von Landschaftspflegeheu (2480) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 81

Tab Anhang D - 45: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff enthaltenen Elemente auf die Produkte bei der Pyrolyse von Landschaftspflegeheu (2480) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 82

Tab Anhang D - 46: Energieinhalte der Produkte und „Reaktionsenthalpie“ bei der Pyrolyse von Landschaftspflegeheu (2480) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)....83

Tab Anhang D - 47: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff chemisch gebundenen Energie auf die Produkte bei der Pyrolyse von Landschaftspflegeheu (2480) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)....84

Tab Anhang D - 48: Gaszusammensetzung, Ausbeuten der Gaskomponenten und Gasdichte bei der Pyrolyse von Landschaftspflegeheu (2480) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)....85

Tab Anhang D - 49: Produktverteilung bei der Pyrolyse von Triticale-Ganzpflanze (2471) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)....86

Tab Anhang D - 50: Produktzusammensetzung bei der Pyrolyse von Triticale-Ganzpflanze (2471) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)....87

Tab Anhang D - 51: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff enthaltenen Elemente auf die Produkte bei der Pyrolyse von Triticale-Ganzpflanze (2471) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)....88

Tab Anhang D - 52: Energieinhalte der Produkte und „Reaktionsenthalpie“ bei der Pyrolyse von Triticale-Ganzpflanze (2471) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)....89

Tab Anhang D - 53: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff chemisch gebundenen Energie auf die Produkte bei der Pyrolyse von Triticale-Ganzpflanze (2471) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)....90

Tab Anhang D - 54: Gaszusammensetzung, Ausbeuten der Gaskomponenten und Gasdichte bei der Pyrolyse von Triticale-Ganzpflanze (2471) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)....91

Tab Anhang D - 55: Produktverteilung bei der Pyrolyse von Maissilage (2475) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)....92

Tab Anhang D - 56: Produktzusammensetzung bei der Pyrolyse von Maissilage (2475) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)....93

Tab Anhang D - 57: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff enthaltenen Elemente auf die Produkte bei der Pyrolyse von Maissilage

(2475) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 94

Tab Anhang D - 58: Energieinhalte der Produkte und „Reaktionsenthalpie“ bei der Pyrolyse von Maissilage (2475) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 95

Tab Anhang D - 59: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff chemisch gebundenen Energie auf die Produkte bei der Pyrolyse von Maissilage (2475) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 96

Tab Anhang D - 60: Gaszusammensetzung, Ausbeuten der Gaskomponenten und Gasdichte bei der Pyrolyse von Maissilage (2475) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 97

Tab Anhang D - 61: Produktverteilung bei der Pyrolyse von Roggen-Ganzpflanzensilage (2473) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 98

Tab Anhang D - 62: Produktzusammensetzung bei der Pyrolyse von Roggen-Ganzpflanzensilage (2473) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 99

Tab Anhang D - 63: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff enthaltenen Elemente auf die Produkte bei der Pyrolyse von Roggen-Ganzpflanzensilage (2473) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 100

Tab Anhang D - 64: Energieinhalte der Produkte und „Reaktionsenthalpie“ bei der Pyrolyse von Roggen-Ganzpflanzensilage (2473) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 101

Tab Anhang D - 65: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff chemisch gebundenen Energie auf die Produkte bei der Pyrolyse von Roggen-Ganzpflanzensilage (2473) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 102

Tab Anhang D - 66: Gaszusammensetzung, Ausbeuten der Gaskomponenten und Gasdichte bei der Pyrolyse von Roggen-Ganzpflanzensilage (2473) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 103

Tab Anhang D - 67: Produktverteilung bei der Pyrolyse von Grünschnittroggensilage (2474) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 104

Tab Anhang D - 68: Produktzusammensetzung bei der Pyrolyse von Grünschnittroggensilage (2474) für verschiedene

Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)..... 105

Tab Anhang D - 69: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff enthaltenen Elemente auf die Produkte bei der Pyrolyse von Grünschnittroggensilage (2474) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)..... 106

Tab Anhang D - 70: Energieinhalte der Produkte und „Reaktionsenthalpie“ bei der Pyrolyse von Grünschnittroggensilage (2474) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)..... 107

Tab Anhang D - 71: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff chemisch gebundenen Energie auf die Produkte bei der Pyrolyse von Grünschnittroggensilage (2474) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)..... 108

Tab Anhang D - 72: Gaszusammensetzung, Ausbeuten der Gaskomponenten und Gasdichte bei der Pyrolyse von Grünschnittroggensilage (2474) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)..... 109

Tab Anhang E - 1: Produktverteilung bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2478) in der Druckpyrolyseanlage (Fallrohrbetrieb) bei 800 °C und verschiedenen Drücken (Körnung: 0,2…0,5 mm)..... 112

Tab Anhang E - 2: Zusammensetzung von Koks und Gas bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2478) in der Druckpyrolyseanlage (Fallrohrbetrieb) bei 800 °C und verschiedenen Drücken (Körnung: 0,2…0,5 mm)..... 112

Tab Anhang E - 3: Gaszusammensetzung und -ausbeuten bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2478) in der Druckpyrolyseanlage (Fallrohrbetrieb) bei 800 °C und verschiedenen Drücken (Körnung: 0,2…0,5 mm)..... 113

Tab Anhang E - 4: Produktverteilung bei der Pyrolyse von Weizenstroh (2296) in der Druckpyrolyseanlage (Fallrohrbetrieb) bei 800 °C und verschiedenen Drücken (Körnung: 0,2…0,5 mm)..... 114

Tab Anhang E - 5: Zusammensetzung von Koks und Gas bei der Pyrolyse von Weizenstroh (2296) in der Druckpyrolyseanlage (Fallrohrbetrieb) bei 800 °C und verschiedenen Drücken (Körnung: 0,2…0,5 mm)..... 114

Tab Anhang E - 6: Gaszusammensetzung und -ausbeuten bei der Pyrolyse von Weizenstroh (2296) in der Druckpyrolyseanlage

(Fallrohrbetrieb) bei 800 °C und verschiedenen Drücken (Körnung: 0,2…0,5 mm) 115

Tab Anhang F - 1: Produktverteilung bei der Weizenstrohpyrolyse (2275) bei 400 und 500 °C und verschiedenen Aufheizgeschwindigkeiten im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm) 116

Tab Anhang F - 2: Produktzusammensetzung bei der Weizenstrohpyrolyse (2275) bei 400 und 500 °C und verschiedenen Aufheizgeschwindigkeiten im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm) 117

Tab Anhang F - 3: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff enthaltenen Elemente auf die Produkte bei der Weizenstrohpyrolyse (2275) bei 400 und 500 °C und verschiedenen Aufheizgeschwindigkeiten im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm) 118

Tab Anhang F - 4: Energieinhalte der Produkte und „Reaktionsenthalpie“ bei der Weizenstrohpyrolyse (2275) bei 400 und 500 °C und verschiedenen Aufheizgeschwindigkeiten im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm)..... 119

Tab Anhang F - 5: Prozentuale Verteilung der chemisch gebundenen Energie bei der Weizenstrohpyrolyse (2275) bei 400 und 500 °C und verschiedenen Aufheizgeschwindigkeiten im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm)..... 120

Tab Anhang F - 6: Gaszusammensetzung und Gasausbeuten bei der Weizenstrohpyrolyse (2275) bei 400 und 500 °C und verschiedenen Aufheizgeschwindigkeiten im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm)..... 121

Tab Anhang F - 7: Produktverteilung bei der Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) bei 400 und 500 °C und verschiedenen Aufheizgeschwindigkeiten im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm) 126

Tab Anhang F - 8: Produktzusammensetzung bei der Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) bei 400 und 500 °C und verschiedenen Aufheizgeschwindigkeiten im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm)..... 127

Tab Anhang F - 9: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff enthaltenen Elemente auf die Produkte bei der Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) bei 400 und 500 °C und verschiedenen Aufheizgeschwindigkeiten im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm)..... 128

Tab Anhang F - 10: Energieinhalte der Produkte und „Reaktionsenthalpie“ bei der Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) bei 400

und 500 °C und verschiedenen Aufheizgeschwindigkeiten im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm) 129

Tab Anhang F - 11: Prozentuale Verteilung der chemisch gebundenen Energie bei der Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) bei 400 und 500 °C und verschiedenen Aufheizgeschwindigkeiten im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm) 130

Tab Anhang F - 12: Gaszusammensetzung, Ausbeuten der Gaskomponenten und Gasdichte bei der Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) bei 400 und 500 °C und verschiedenen Aufheizgeschwindigkeiten im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm) 131

Tab Anhang F - 13: Produktverteilung bei der Pyrolyse von Maissilage (2475), Triticale-Ganzpflanze (2471) und Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 500 °C und verschiedenen Aufheizgeschwindigkeiten im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm) 132

Tab Anhang F - 14: Produktzusammensetzung bei der Pyrolyse von Maissilage (2475), Triticale-Ganzpflanze (2471) und Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 500 °C und verschiedenen Aufheizgeschwindigkeiten im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm) 133

Tab Anhang F - 15: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff enthaltenen Elemente auf die Produkte bei der Pyrolyse von Maissilage (2475), Triticale-Ganzpflanze (2471) und Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 500 °C und verschiedenen Aufheizgeschwindigkeiten im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm) 134

Tab Anhang F - 16: Energieinhalte der Produkte und „Reaktionsenthalpie“ bei der Pyrolyse von Maissilage (2475), Triticale-Ganzpflanze (2471) und Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 500 °C und verschiedenen Aufheizgeschwindigkeiten im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm) 135

Tab Anhang F - 17: Prozentuale Verteilung der chemisch gebundenen Energie bei der Pyrolyse von Maissilage (2475), Triticale-Ganzpflanze (2471) und Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 500 °C und verschiedenen Aufheizgeschwindigkeiten im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm) 136

Tab Anhang F - 18: Gaszusammensetzung, Ausbeuten der Gaskomponenten und Gasdichte bei der Pyrolyse von Maissilage (2475), Triticale-Ganzpflanze (2471) und Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 500 °C und verschiedenen Aufheizgeschwindigkeiten im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm) 137

Tab Anhang G - 1: Produktverteilung bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 380 und 550 °C sowie verschiedenen Verweilzeiten bei Endtemperatur im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 138

Tab Anhang G - 2: Produktzusammensetzung bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 380 und 550 °C sowie verschiedenen Verweilzeiten bei Endtemperatur im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 139

Tab Anhang G - 3: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff enthaltenen Elemente auf die Produkte bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 380 und 550 °C sowie verschiedenen Verweilzeiten bei Endtemperatur im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 140

Tab Anhang G - 4: Energieinhalte der Produkte und „Reaktionsenthalpie“ bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 380 und 550 °C sowie verschiedenen Verweilzeiten bei Endtemperatur im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 141

Tab Anhang G - 5: Prozentuale Verteilung der chemisch gebundenen Energie bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 380 und 550 °C sowie verschiedenen Verweilzeiten bei Endtemperatur im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 142

Tab Anhang G - 6: Gaszusammensetzung, Ausbeuten der Gaskomponenten und Gasdichte bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 380 und 550 °C sowie verschiedenen Verweilzeiten bei Endtemperatur im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 143

Tab Anhang H - 1: Produktverteilung bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 500 °C und verschiedenen Partikelgrößen des Einsatzstoffes im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 144

Tab Anhang H - 2: Produktzusammensetzung bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 500 °C und verschiedenen Partikelgrößen des Einsatzstoffes im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 145

Tab Anhang H - 3: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff enthaltenen Elemente auf die Produkte bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 500 °C und verschiedenen Partikelgrößen des Einsatzstoffes im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 146

Tab Anhang H - 4: Energieinhalte der Produkte und „Reaktionsenthalpie“ bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 500 °C und verschiedenen Partikelgrößen des Einsatzstoffes im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung).....147

Tab Anhang H - 5: Prozentuale Verteilung der chemisch gebundenen Energie bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 500 °C und verschiedenen Partikelgrößen des Einsatzstoffes im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung).....148

Tab Anhang H - 6: Gaszusammensetzung, Ausbeuten der Gaskomponenten und Gasdichte bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 500 °C und verschiedenen Partikelgrößen des Einsatzstoffes im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung).....149

Tab Anhang I - 1: Über die Mischungsregel aus den Werten der Ausgangsstoffe berechnete Zusammensetzungen und Energieinhalte für Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) in Mischung mit Grünschnittroggensilage (2474).....150

Tab Anhang I - 2: Einfluss der Zumischrate an Grünschnittroggensilage (2474) auf die Produktverteilung bei der Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung) 151

Tab Anhang I - 3: Einfluss der Zumischrate an Grünschnittroggensilage (2474) auf die Produktzusammensetzung bei der Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung) 152

Tab Anhang I - 4: Mittels Mischungsregel (MR) berechnete Werte für die Produktzusammensetzung bei der Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) mit Grünschnittroggensilage (2474) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung) sowie prozentuale Abweichung von den experimentell bestimmten Werten.....153

Tab Anhang I - 5: Einfluss der Zumischrate an Grünschnittroggensilage (2474) auf die Verteilung der im Einsatzstoff enthaltenen Elemente auf die Produkte bei der Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung).....154

Tab Anhang I - 6: Einfluss der Zumischrate an Grünschnittroggensilage (2474) auf die Energieinhalte der Produkte bei der Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung) 155

Tab Anhang I - 7: Mittels Mischungsregel (MR) berechnete Werte für die Energieinhalte der Produkte bei der Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) mit Grünschnittroggensilage (2474) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung) sowie prozentuale Abweichung von den experimentell bestimmten Werten 155

Tab Anhang I - 8: Einfluss der Zumischrate an Grünschnittroggensilage (2474) auf die Verteilung der chemisch gebundenen Energie bei der Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung) 156

Tab Anhang I - 9: Einfluss der Zumischrate an Grünschnittroggensilage (2474) auf die Gaszusammensetzung, die Ausbeuten der Gaskomponenten und die Gasdichte bei der Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung) 157

Tab Anhang I - 10: Mittels Mischungsregel (MR) berechnete Werte für die Gaszusammensetzung, die Ausbeuten der Gaskomponenten und die Gasdichte bei der Pyrolyse von Walsrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) mit Grünschnittroggensilage (2474) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung) sowie prozentuale Abweichung von den experimentell bestimmten Werten 158

Tab Anhang I - 11: Über die Mischungsregel aus den Werten der Ausgangsstoffe berechnete Zusammensetzungen und Energieinhalte für Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) in Mischung mit Weizenstroh (2275) 159

Tab Anhang I - 12: Einfluss der Zumischrate an Weizenstroh (2275) auf die Produktverteilung bei der Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung) 159

Tab Anhang I - 13: Einfluss der Zumischrate an Weizenstroh (2275) auf die Produktzusammensetzung bei der Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung) 160

Tab Anhang I - 14: Mittels Mischungsregel (MR) berechnete Werte für die Produktzusammensetzung bei der Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) mit Weizenstroh (2275) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung) sowie prozentuale Abweichung von den experimentell bestimmten Werten 161

Tab Anhang I - 15: Einfluss der Zumischrate an Weizenstroh (2275) auf die Verteilung der im Einsatzstoff enthaltenen Elemente auf die Produkte bei der Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde,

2472) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung).....162

Tab Anhang I - 16: Einfluss der Zumischrate an Weizenstroh (2275) auf die Energieinhalte der Produkte bei der Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung).....163

Tab Anhang I - 17: Mittels Mischungsregel (MR) berechnete Werte für die Energieinhalte der Produkte bei der Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) mit Weizenstroh (2275) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung) sowie prozentuale Abweichung von den experimentell bestimmten Werten.....164

Tab Anhang I - 18: Einfluss der Zumischrate an Weizenstroh (2275) auf die Verteilung der chemisch gebundenen Energie bei der Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung) 165

Tab Anhang I - 19. Einfluss der Zumischrate an Weizenstroh (2275) auf die Gaszusammensetzung, die Ausbeuten der Gaskomponenten und die Gasdichte bei der Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung) 166

Tab Anhang I - 20. Mittels Mischungsregel (MR) berechnete Werte für die Gaszusammensetzung, die Ausbeuten der Gaskomponenten und die Gasdichte bei der Pyrolyse von Walsrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) mit Weizenstroh (2275) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung) sowie prozentuale Abweichung von den experimentell bestimmten Werten 167

Tab Anhang I - 21. Über die Mischungsregel aus den Werten der Ausgangsstoffe berechnete Zusammensetzungen und Energieinhalte für Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) in Mischung mit Maissilage (2475).....168

Tab Anhang I - 22: Einfluss der Zumischrate an Maissilage (2475) auf die Produktverteilung bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung) 168

Tab Anhang I - 23: Einfluss der Zumischrate an Maissilage (2475) auf die Produktzusammensetzung bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung).....169

Tab Anhang I - 24: Mittels Mischungsregel (MR) berechnete Werte für die Produktzusammensetzung bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) mit Maissilage (2475) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung) sowie

prozentuale Abweichung von den experimentell bestimmten Werten 170

Tab Anhang I - 25: Einfluss der Zumischrate an Maissilage (2475) auf die Verteilung der im Einsatzstoff enthaltenen Elemente auf die Produkte bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung) 171

Tab Anhang I - 26: Einfluss der Zumischrate an Maissilage (2475) auf die Energieinhalte der Produkte bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung) 172

Tab Anhang I - 27: Mittels Mischungsregel (MR) berechnete Werte für die Energieinhalte der Produkte bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) mit Maissilage (2475) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung) sowie prozentuale Abweichung von den experimentell bestimmten Werten 172

Tab Anhang I - 28: Einfluss der Zumischrate an Maissilage (2475) auf die Verteilung der chemisch gebundenen Energie bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung) 173

Tab Anhang I - 29: Einfluss der Zumischrate an Maissilage (2475) auf die Gaszusammensetzung, die Ausbeuten der Gaskomponenten und die Gasdichte bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung) 174

Tab Anhang I - 30: Mittels Mischungsregel (MR) berechnete Werte für die Gaszusammensetzung, die Ausbeuten der Gaskomponenten und die Gasdichte bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) mit Maissilage (2475) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung) sowie prozentuale Abweichung von den experimentell bestimmten Werten 175

Tab Anhang J - 1: Produktverteilung bei der Pyrolyse von Xylan (1234) und Xylan (Birkenholz, 2664) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 176

Tab Anhang J - 2: Produktzusammensetzung bei der Pyrolyse von Xylan (1234) und Xylan (Birkenholz, 2664) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 177

Tab Anhang J - 3: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff enthaltenen Elemente auf die Produkte bei der Pyrolyse von Xylan (1234)

und Xylan (Birkenholz, 2664) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung).....178

Tab Anhang J - 4: Energieinhalte der Produkte und „Reaktionsenthalpie“ bei der Pyrolyse von Xylan (1234) und Xylan (Birkenholz, 2664) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 179

Tab Anhang J - 5: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff chemisch gebundenen Energie auf die Produkte bei der Pyrolyse von Xylan (1234) und Xylan (Birkenholz, 2664)) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung).....180

Tab Anhang J - 6: Gaszusammensetzung, Ausbeuten der Gaskomponenten und Gasdichte bei der Pyrolyse von Xylan (1234) und Xylan (Birkenholz, 2664) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 181

Tab Anhang J - 7: Produktverteilung bei der Pyrolyse von Fichte-Sulfit-Zellstoff (2621) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung).....182

Tab Anhang J - 8: Produktzusammensetzung bei der Pyrolyse von Fichte-Sulfit-Zellstoff (2621) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung).....183

Tab Anhang J - 9: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff enthaltenen Elemente auf die Produkte bei der Pyrolyse von Fichte-Sulfit-Zellstoff (2621) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung).....184

Tab Anhang J - 10: Energieinhalte der Produkte und „Reaktionsenthalpie“ bei der Pyrolyse von Fichte-Sulfit-Zellstoff (2621) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung).....185

Tab Anhang J - 11: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff chemisch gebundenen Energie auf die Produkte bei der Pyrolyse von Fichte-Sulfit-Zellstoff (2621) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung).....186

Tab Anhang J - 12: Gaszusammensetzung, Ausbeuten der Gaskomponenten und Gasdichte bei der Pyrolyse von Fichte-Sulfit-Zellstoff (2621) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 187

Tab Anhang J - 13: Produktverteilung bei der Pyrolyse von Lignin (Alkali, 2623 und 2665) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung).....188

Tab Anhang J - 14: Produktzusammensetzung bei der Pyrolyse von Lignin (Alkali, 2623 und 2665) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 189

Tab Anhang J - 15: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff enthaltenen Elemente auf die Produkte bei der Pyrolyse von Lignin (Alkali, 2623 und 2665) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 190

Tab Anhang J - 16: Energieinhalte der Produkte und „Reaktionsenthalpie“ bei der Pyrolyse von Lignin (Alkali, 2623 und 2665) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 191

Tab Anhang J - 17: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff chemisch gebundenen Energie auf die Produkte bei der Pyrolyse von Lignin (Alkali, 2623 und 2665) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 192

Tab Anhang J - 18: Gaszusammensetzung, Ausbeuten der Gaskomponenten und Gasdichte bei der Pyrolyse von Lignin (Alkali, 2623 und 2665) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung) 193

Tab Anhang K - 1: Ergebnisse der DSC-Messungen für verschiedene Biomassen und die Biopolymere für die Pyrolyse bei einer Aufheizrate von 20 K/min 196

Tab Anhang K - 2: Ergebnisse der thermogravimetrischen Untersuchungen zum Einfluss von Druck und Aufheizgeschwindigkeit auf die Pyrolyse von Maissilage (2475) (Stickstoffatmosphäre, < 2 mm; Gerät: HP-TGA DMT) 203

Tab Anhang K - 3: Ergebnisse der thermogravimetrischen Untersuchungen zum Druckeinfluss auf die Pyrolyse von verschiedenen Hölzern (10 K/min, Stickstoffatmosphäre, < 2 mm; Gerät: HP-TGA DMT) 203

Tab Anhang K - 4: Ergebnisse der thermogravimetrischen Untersuchungen zum Druckeinfluss auf die Pyrolyse von verschiedenen Strohsorten (10 K/min, Stickstoffatmosphäre, < 2 mm; Gerät: HP-TGA DMT) 203

Tab Anhang K - 5: Ergebnisse der thermogravimetrischen Untersuchungen zum Druckeinfluss auf die Pyrolyse von Pappel (Kurzumtrieb, 2469), Lanschaftspflegeheu (2480) und Triticale-Ganzpflanze (2471) (10 K/min, Stickstoffatmosphäre, < 2 mm; Gerät: HP-TGA DMT) 204

Tab Anhang K - 6: Ergebnisse der thermogravimetrischen Untersuchungen zum Druckeinfluss auf die Pyrolyse von Grünschnittroggen- und Roggenganzpflanzensilage (10 K/min, Stickstoffatmosphäre, < 2 mm; Gerät: HP-TGA DMT) 204

Tab Anhang M - 1: Ergebnisse der Modellierung (Teil 1) der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei verschiedenen Temperaturen....207

Tab Anhang M - 2: Ergebnisse der Modellierung (Teil 2) der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei verschiedenen Temperaturen....208

Tab Anhang M - 3: Ergebnisse der Modellierung der Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) bei verschiedenen Temperaturen....209

Tab Anhang M - 4: Ergebnisse der Modellierung der Pyrolyse von Pappel (Kurzumtrieb, 2469) bei verschiedenen Temperaturen....210

Tab Anhang M - 5: Ergebnisse der Modellierung (Teil 1) der Pyrolyse von Weizenstroh (2275) bei verschiedenen Temperaturen....211

Tab Anhang M - 6: Ergebnisse der Modellierung (Teil 2) der Pyrolyse von Weizenstroh (2275) bei verschiedenen Temperaturen....212

Tab Anhang M - 7: Ergebnisse der Modellierung der Pyrolyse von Weizenstroh, grau (2297) bei verschiedenen Temperaturen....213

Tab Anhang M - 8: Ergebnisse der Modellierung der Pyrolyse von Rapsstroh (2386) bei verschiedenen Temperaturen....214

Tab Anhang M - 9: Ergebnisse der Modellierung der Pyrolyse von Landschaftspflegeheu (2480) bei verschiedenen Temperaturen....215

Tab Anhang M - 10: Ergebnisse der Modellierung der Pyrolyse von Triticale-Ganzpflanze (2471) bei verschiedenen Temperaturen 216

Tab Anhang M - 11: Ergebnisse der Modellierung (1) der Pyrolyse von Maissilage (2475) bei verschiedenen Temperaturen....217

Tab Anhang M - 12: Ergebnisse der Modellierung (2) der Pyrolyse von Maissilage (2475) bei verschiedenen Temperaturen....218

Tab Anhang M - 13: Ergebnisse der Modellierung der Pyrolyse von Roggen-Ganzpflanzensilage (2473) bei verschiedenen Temperaturen....219

Tab Anhang M - 14: Ergebnisse der Modellierung der Pyrolyse von Grünschnittroggensilage (2474) bei verschiedenen Temperaturen....220

Tab Anhang M - 15: Ergebnisse der Modellierung der Pyrolyse von Xylan (1234) und Xylan, Birkenholz (2664) bei verschiedenen Temperaturen221

Tab Anhang M - 16: Ergebnisse der Modellierung der Pyrolyse von Weizenstroh (2275) bei verschiedenen Aufheizgeschwindigkeiten und Pyrolysetemperaturen von 400 °C....222

Tab Anhang M - 17: Ergebnisse der Modellierung der Pyrolyse von Weizenstroh (2275) bei verschiedenen Aufheizgeschwindigkeiten und Pyrolysetemperaturen von 500 °C....223

Tab Anhang M - 18: Ergebnisse der Modellierung der Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) bei verschiedenen Aufheizgeschwindigkeiten und Pyrolysetemperaturen von 400 °C..... 224

Tab Anhang M - 19: Ergebnisse der Modellierung der Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) bei verschiedenen Aufheizgeschwindigkeiten und Pyrolysetemperaturen von 500 °C..... 225

Tab Anhang M - 20: Ergebnisse der Modellierung der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei verschiedenen Aufheizgeschwindigkeiten und einer Pyrolysetemperatur von 500 °C..... 226

Tab Anhang M - 21: Ergebnisse der Modellierung der Pyrolyse von Triticale-Ganzpflanze (2471) bei verschiedenen Aufheizgeschwindigkeiten und einer Pyrolysetemperatur von 500 °C..... 227

Tab Anhang M - 22: Ergebnisse der Modellierung der Pyrolyse von Maissilage (2475) bei verschiedenen Aufheizgeschwindigkeiten und einer Pyrolysetemperatur von 500 °C..... 228

Anhang A Brennstoffcharakterisierung

Tab Anhang A - 1: Bestimmungsmethoden zu den Analysendaten aus den Datenbanken der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft

Parameter	Analysenmethode
Immediatanalyse	
- Wasser	DIN 51718
- Asche	DIN 51719 (Veraschung bei 815 °C)
- Flüchtige	DIN 51720
- Fixer Kohlenstoff	Differenzbildung
Elementaranalyse	
- Kohlenstoff	DIN ISO 10694
- Wasserstoff	Elementaranalyse
- Stickstoff	DIN ISO 13878
- Gesamtschwefel (1)	Elementaranalyse
- Gesamtschwefel (2)	RFA (Hausmethode)
- Sauerstoff (1)	Elementaranalyse
- Sauerstoff (2)	Ber. nach DK-Formel
- Chlor (1)	VDLUFA-Methodenb. Bd. III
- Chlor (2)	RFA (Hausmethode)
- Kalium (1)	VDLUFA-Methodenb. Bd. III
- Kalium (2)	RFA (Hausmethode)
Heizwert/Brennwert	
- Hu	DIN 51900 (Bombenkalorimeter)
- Ho	DIN 51900 (Bombenkalorimeter)

Tab Anhang A - 2: Vergleich von Analysendaten zur Brennstoffzusammensetzung mit Werten aus der Datenbank der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft

Biomasse *Angaben in Ma.-%*	Winter-weizen-stroh		Weizen-stroh 2184	Winter-weizen-stroh		Weizen-stroh 2275	Weizen-stroh 2296	Winter-weizen-stroh, grau	Weizen-stroh, grau 2279	Weizen-stroh, grau grau 2297	Winter-triticale		Triticale 2471
Darreichungsform	n=	Halme	Halme	n=	Pellet	Pellet	Pellet	n=	-	Halme	Pellet	n=	-	Pellet
Immediatanalyse in Ma-%														
- Wasser (an)	57	9,85	5,35	-	k. A.	6,81	8,20	-	k. A.	7,26	7,66	47	10,9	8,66
- Asche (wf)	62	6,12	6,59	-	k. A.	8,16	8,71	2	5,4	6,63	6,79	48	4,8	5,27
- Flüchtige (wf)	62	76,55	74,83	-	k. A.	73,17	72,29	2	76,15	74,52	76,28	48	78,3	79,35
- Fixer Kohlenstoff (wf)	62	17,7	18,57	-	k. A.	18,67	19,00	2	18,5	18,85	16,93	48	16,9	15,38
Summe														
Elementaranalyse in Ma-% (wf)														
- Kohlenstoff	263	46,52	46,39	3	45,00	45,57	45,08	5	45,86	47,19	46,62	53	45,6	46
- Wasserstoff	69	5,75	6,02	3	5,70	5,57	5,58	5	5,80	5,65	5,76	53	5,92	5,92
- Stickstoff	173	0,66	0,77	3	0,78	0,63	0,78	5	0,65	0,72	0,94	53	1,11	1,11
- Gesamtschwefel	144	0,19	0,19	-	k. A.	0,13	0,15	4	k. A.	0,16	0,24	33	0,15	0,19
- Gesamtschwefel	79	0,09	-	3	0,12	-	-	1	k. A.	-	-	47	0,1	-
- Sauerstoff	6	41,00	40,03	-	k. A.	39,69	39,69	4	k. A.	39,65	39,65	-	k. A.	41,54
- Sauerstoff	59	40,80	-	3	40,5	-	-	1	43,7	-	-	46	42,4	-
Summe														
- Chlor	6	0,26	-	-	k. A.	-	-	4	k. A.	-	-	6	0,20	-
- Chlor	79	0,20	0,11	3	0,30	0,16	0,15	1	0,03	0,10	0,06	47	0,17	0,021
- Kalium	6	1,38	-	-	k. A.	-	-	4	0,83	-	-	6	0,72	-
- Natrium	95	1,15	1,46	3	1,51	1,75	1,89	1	0,51	0,88	0,86	47	0,90	0,53
Heizwert/Brennwert in MJ/kg (wf)														
- H_O	2	17,34	17,00	-	k. A.	16,72	16,76	4	17,21	17,34	17,28	6	17,47	17,035
- H_U	2	18,63	18,31	-	k. A.	17,94	17,98	4	18,45	18,58	18,54	6	18,27	18,328

k. A. ... keine Angabe

Anmerkung: Bestimmungsmethoden für die Analysendaten der TLL siehe Anhang A 1 (gleiche Reihenfolge)

Tab Anhang A - 3: Mittels Röntgenfluoreszenz bestimmte Elementgehalte in den Aschen (550 °C) der holzartigen Biomassen

Biomasse *Angaben in Ma.-%*	Sägerestholz (rindenfrei)		Waldrest-holz mit Rinde	Sägerest-holz (Buche, rindenfrei)	Industrie-restholz (Span-platte)	Pappel (KUP)	Cellu-lose	Fichte-Sulfit-zellstoff	Xylan	Xylan (aus Birken-holz)	Alkali-Lignin		Organo-solv-Lignin
Probenbezeichnung IEC	2276	2478	2472	2309	2277	2469	2625	2621	-	2664	2623	2665	2624
Natrium	n.n.	0,61	0,19	1,15	2,35	0,21	n.b.	0,87	n.b.	n.b.	53,92	n.b.	n.b.
Magnesium	4,92	3,98	2,90	6,60	4,42	2,47	n.b.	4,64	n.b.	n.b.	n.n.	n.b.	n.b.
Aluminium	0,80	1,32	0,86	0,53	2,00	0,37	n.b.	0,99	n.b.	n.b.	0,07	n.b.	n.b.
Silizium	3,35	8,53	2,54	0,60	4,36	0,47	n.b.	2,01	n.b.	n.b.	n.n.	n.b.	n.b.
Phosphor	1,29	1,60	1,67	1,28	2,40	5,36	n.b.	n.n.	n.b.	n.b.	0,20	n.b.	n.b.
Schwefel	0,90	0,94	0,83	1,20	2,88	1,00	n.b.	34,21	n.b.	n.b.	18,12	n.b.	n.b.
Chlor	0,05	0,52	0,09	0,12	0,47	0,09	n.b.	0,86	n.b.	n.b.	0,10	n.b.	n.b.
Kalium	11,00	10,50	9,28	22,98	9,88	16,75	n.b.	n.n.	n.b.	n.b.	0,80	n.b.	n.b.
Calcium	28,33	23,80	28,10	17,80	20,19	25,07	n.b.	28,01	n.b.	n.b.	0,14	n.b.	n.b.
Titan	0,05	0,26	0,05	0,01	5,58	0,01	n.b.	0,87	n.b.	n.b.	n.n.	n.b.	n.b.
Eisen	1,33	1,59	0,48	0,46	1,71	0,21	n.b.	0,56	n.b.	n.b.	0,02	n.b.	n.b.
Barium	0,39	0,25	0,28	0,36	0,36	0,17	n.b.	3,22	n.b.	n.b.	n.n.	n.b.	n.b.
methodenspezifische Orientierungswerte													
Vanadium	0,00	0,00	n.n.	0,00	0,01	n.n.	n.b.	n.n.	n.b.	n.b.	0,02	n.b.	n.b.
Chrom	n.n.	0,01	0,00	n.n.	0,01	0,00	n.b.	n.n.	n.b.	n.b.	n.n.	n.b.	n.b.
Mangan	4,30	3,10	2,08	2,55	1,26	0,04	n.b.	n.n.	n.b.	n.b.	0,02	n.b.	n.b.
Cobalt	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	n.n.	n.b.	n.n.	n.b.	n.b.	n.n.	n.b.	n.b.
Nickel	n.n.	0,01	0,01	0,01	n.n.	0,00	n.b.	n.n.	n.b.	n.b.	n.n.	n.b.	n.b.
Kupfer	0,03	0,04	0,02	0,07	0,03	0,02	n.b.	n.n.	n.b.	n.b.	n.n.	n.b.	n.b.
Zink	0,28	0,26	0,51	0,13	0,51	0,37	n.b.	n.n.	n.b.	n.b.	0,00	n.b.	n.b.
Strontium	0,09	0,07	0,09	0,09	0,06	0,13	n.b.	n.n.	n.b.	n.b.	n.n.	n.b.	n.b.
Molybdän	n.n.	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	n.b.	n.n.	n.b.	n.b.	0,01	n.b.	n.b.
Cadmium	0,00	n.n.	n.n.	n.n.	0,00	0,02	n.b.	n.n.	n.b.	n.b.	n.n.	n.b.	n.b.
Zinn	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0,00	n.n.	n.b.	n.n.	n.b.	n.b.	n.n.	n.b.	n.b.
Antimon	n.n.	n.n.	n.n.	0,00	0,01	n.n.	n.b.	n.n.	n.b.	n.b.	n.n.	n.b.	n.b.
Blei	0,01	0,01	0,02	0,11	0,13	0,02	n.b.	n.n.	n.b.	n.b.	n.n.	n.b.	n.b.
Selen	0,00	n.n.	0,00	n.n.	0,00	0,00	n.b.	n.n.	n.b.	n.b.	n.n.	n.b.	n.b.
Summe Spuren	*4,72*	*3,51*	*2,72*	*2,98*	*2,04*	*0,59*	-	*0,00*	-	-	*0,05*	-	-

n.n. ... nicht nachweisbar; n.b. ... nicht bestimmbar

Tab Anhang A - 4: Mittels Röntgenfluoreszenz bestimmte Elementgehalte in den Aschen (550 °C) der halmgutartigen Biomassen

Biomasse *Angaben in Ma.-%*	Weizenstroh			Weizenstroh, grau	Raps-stroh	Land-schafts-pflege-heu	Triticale-GP	Maissilage		Roggen-GPS	Grün-schnitt-roggen-silage	Gerste-GPS	Gras-silage
Probenbezeichnung IEC	2184	2275	2296	2279	2297	2386	2480	2471	2475	2364	2473	2474	2366	2365
Natrium	0,03	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	1,63	0,16	0,17	0,39	n.n.	0,69	0,50	1,02	3,49
Magnesium	2,41	2,85	1,89	3,03	1,58	1,31	1,75	2,05	2,84	3,01	1,32	1,45	1,87	2,58
Aluminium	0,13	0,19	0,38	0,32	0,51	0,37	1,06	0,51	1,85	3,20	1,01	2,01	3,06	2,25
Silizium	21,97	17,95	21,04	25,26	28,92	1,17	24,21	24,71	19,47	13,62	20,34	24,69	13,67	14,25
Phosphor	0,52	0,41	1,07	1,23	1,09	1,38	2,49	2,98	5,28	4,53	2,53	2,40	3,22	2,30
Schwefel	0,79	0,89	1,38	0,69	1,46	3,75	1,82	1,17	1,60	1,53	1,62	1,23	1,63	2,14
Chlor	1,66	2,02	1,76	1,49	0,92	6,90	1,79	0,33	0,76	2,50	4,50	2,80	3,90	7,70
Kalium	22,15	21,50	21,67	13,29	12,62	22,11	13,66	13,66	16,80	22,08	21,40	14,00	23,89	18,24
Calcium	7,29	4,62	6,32	7,55	5,95	18,59	8,17	7,63	5,53	5,98	4,86	4,46	7,23	8,25
Titan	0,01	0,01	0,03	0,03	0,04	0,02	0,07	0,04	0,20	0,46	0,13	0,20	0,39	0,31
Eisen	0,17	0,18	0,59	0,28	0,42	0,09	0,65	0,38	2,20	3,79	1,61	2,59	2,38	2,10
Barium	0,09	0,05	0,05	0,08	0,06	0,02	0,04	0,03	0,04	n.n.	0,05	0,07	n.n.	n.n.
methodenspezifische Orientierungswerte														
Vanadium	0,00	n.n.	0,00	0,00	0,00	0,00	n.n.	n.n.	0,01	n.n.	0,00	0,01	n.n.	n.n.
Chrom	0,02	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0,00	0,00	0,01	0,07	0,00	0,01	n.n.	n.n.
Mangan	0,08	0,03	0,04	0,04	0,07	0,02	0,09	0,07	0,07	0,10	0,04	0,05	n.n.	0,23
Cobalt	0,00	n.n.	0,00	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0,00	n.n.	0,00	0,00	n.n.	n.n.
Nickel	0,00	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0,00	0,00	0,01	n.n.	0,00	0,00	n.n.	n.n.
Kupfer	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Zink	0,03	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,03	0,05	0,05	0,05	0,02	0,03	0,04	0,03
Strontium	0,05	0,02	0,03	0,05	0,04	0,09	0,05	0,03	n.n.	0,07	0,03	0,04	0,06	0,07
Molybdän	0,00	n.n.	0,00	n.n.	n.n.	0,00	0,00	0,00	0,00	n.n.	0,00	0,00	n.n.	n.n.
Cadmium	0,00	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
Zinn	0,00	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0,00	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
Antimon	0,00	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
Blei	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	n.n.	0,00	0,00	n.n.	n.n.
Selen	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	n.n.	0,00	0,00	0,04	n.n.	0,00	0,00	n.n.	n.n.
Summe Spuren	*0,20*	*0,07*	*0,10*	*0,12*	*0,12*	*0,13*	*0,20*	*0,17*	*0,21*	*0,29*	*0,12*	*0,15*	*0,10*	*0,34*

n.n. ... nicht nachweisbar; n.b. ... nicht bestimmbar

Tab Anhang A - 5: Verfahren zur Bestimmung der Biomassestoffgruppen

Stoffgruppe	Bestimmungsverfahren
Extrakstoffe	Extraktion von 2 x 5 g Biomasse (luftgetrocknet) mit je 200 ml Lösungsmittel (Ethanol-/Toluol-Gemisch 1:2) in einer Soxhletapparatur für 6 h; Trocknung des erhaltenen Rückstands bei 50 °C für 24 h im Vakuumtrockenschrank
Lignin	1 g extrahierte Biomasse (getrocknet) wird mit 10 ml 72%-iger H_2SO_4 für 1 h bei Raumtemperatur stehengelassen (alle 5-10min rühren); anschließend Zugabe von 280 ml H_2O (dest.); Kochen für 5 h; Absaugen; mit destilliertem Wasser säurefrei waschen; Trocknung bei 80 °C im Vakuumtrockenschrank bis zur Massekonstanz
Holocellulose	2 g extrahierte Biomasse (getrocknet) mit 30 ml H_2O (dest.) auf 75 °C erwärmen; Zugabe von 0,6 g $NaClO_3$ in 3,4 ml H_2O (dest.) + 0,2 ml Essigsäure, 1 h bei 75 °C → 3x wiederholen; Absaugen, Waschen mit H_2O (dest.) bis säurefrei, dann mit Ethanol; Trocknung bei 80 °C im Vakuumtrockenschrank bis zur Massekonstanz
Cellulose	1 g Holocellulose (getrocknet) mit 20 ml 24%-iger NaOH-Lösung bei Raumtemperatur für 4 h unter Argonatmosphäre rühren; Absaugen und mit H_2O (dest.) waschen; verbleibenden Feststoff mit 20 ml 17,5%-iger KOH-Lösung + 4 % H_3BO_3 bei Raumtemperatur für 4 h unter Argonatmosphäre rühren; Absaugen; Waschen mit verdünnter Essigsäure, anschließend mit H_2O (dest.) bis zur Neutralität; Trocknung bei 80 °C im Vakuumtrockenschrank bis zur Massekonstanz
Hemicellulose	Berechnung als Differenz aus Holocellulose und Cellulose

Anhang B Technische Ausrüstung

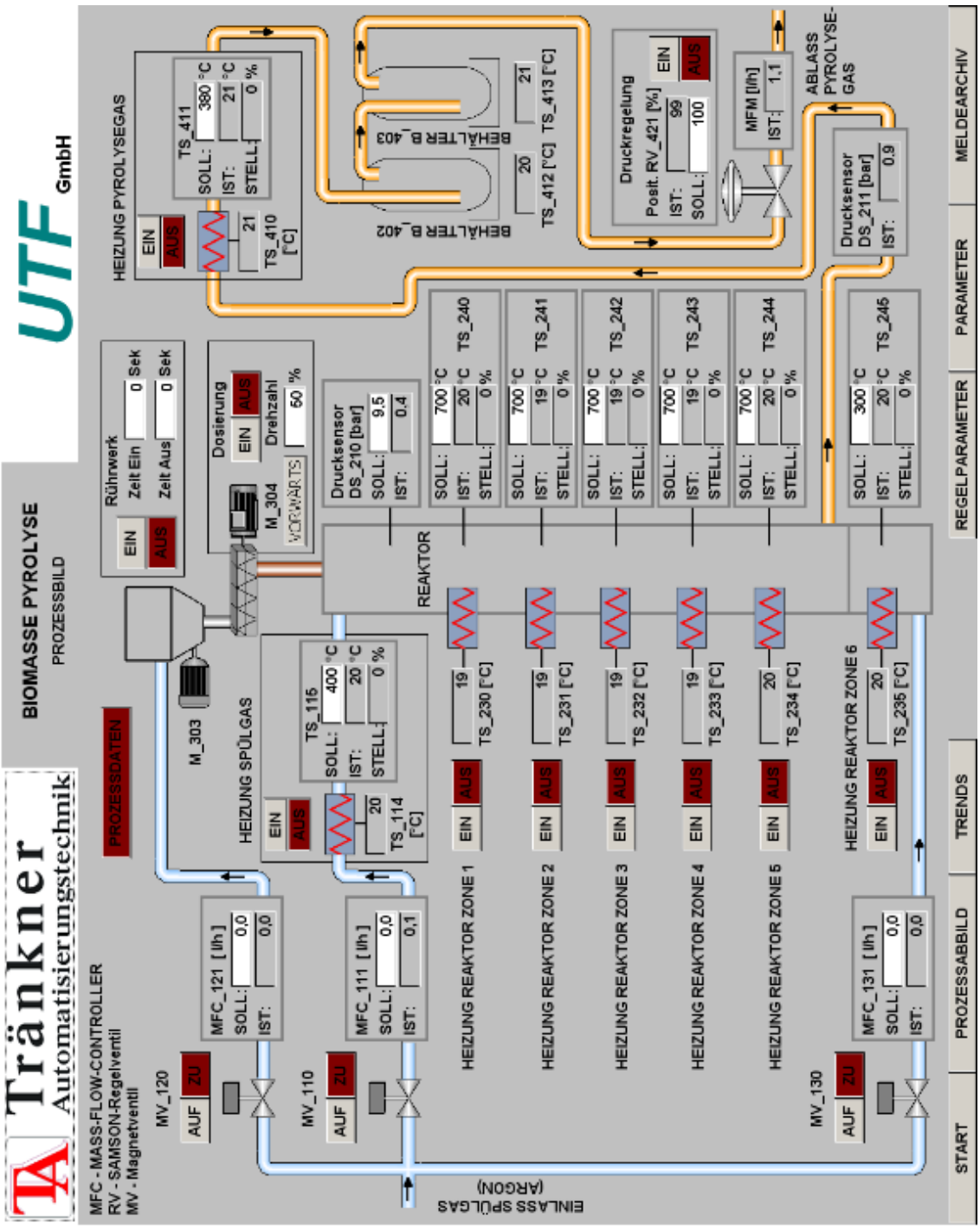
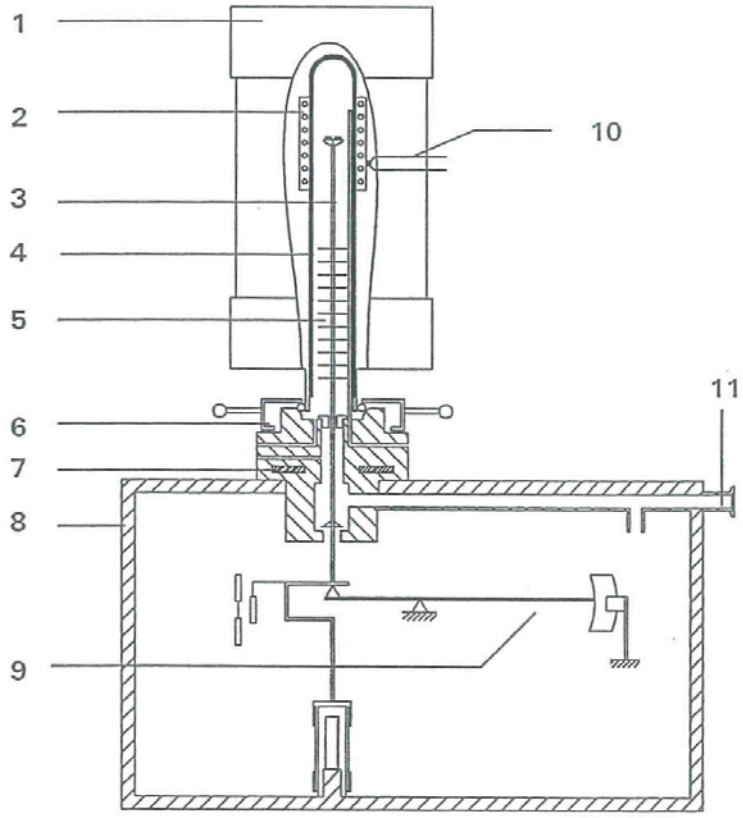


Abb Anhang B - 1: Bedienoberfläche der Prozesssoftware an der Druckpyrolyseanlage



1- Ofen
2- Heizelement
3- Probenträgersystem
4- Schutzrohr
5- Strahlungsschutz
6- Kreuzkopf
7- Thermostatisierung
8- Gehäuse
9- Analysenwaage
10- Regelthermoelement
11- Anschluß Evakuiersystem

Abb Anhang B - 2: Aufbau der Netzsch STA 409 C (TG-DSC)

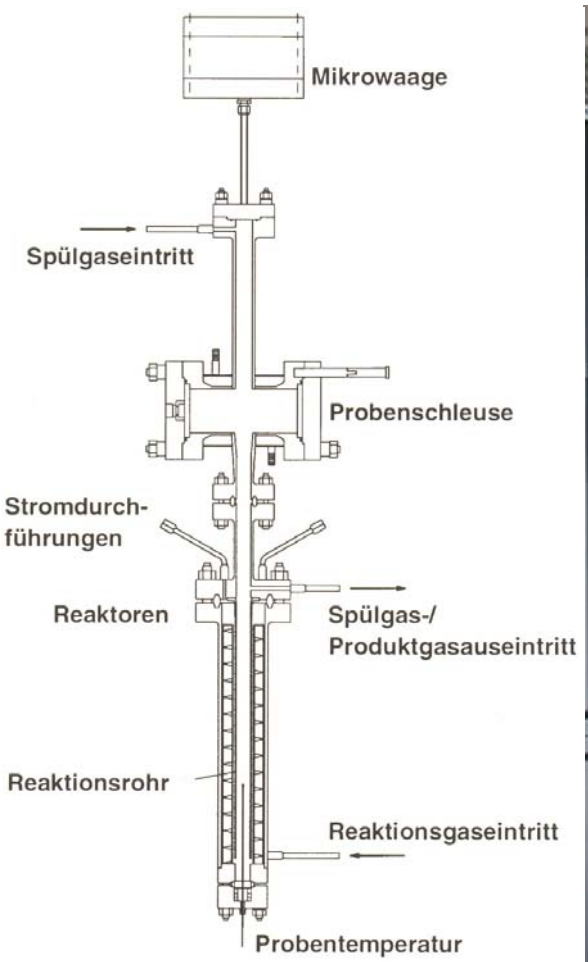


Abb Anhang B - 3: Hochdruckthermowaage (HP-TG) der Fa. DMT

Anhang C Vorgehensweise und Versuchspläne

Berechnungen zum Pyrolysegas

Die Elementarzusammensetzung des Pyrolysegases wurde aus der Komponentenzusammensetzung (Gasanalyse) mit Hilfe der Gleichungen (C - 1) bis (C - 5) berechnet:

1) Masse der Pyrolysegaskomponente m_k:

$$m_k = v_k \cdot \rho_k \cdot V_{Gas} \qquad \text{(C - 1)}$$

2) Masse des jeweiligen Elementes in der Pyrolysegaskomponente $m_{Ei,k}$:

$$m_{Ei,k} = m_k \cdot \frac{M_{E,i}^k}{M_k} \cdot \frac{n_{E,i}^k}{n_k} \qquad \text{(C - 2)}$$

3) Masse des jeweiligen Elementes im Pyrolysegas $m_{E,i}$

$$m_{E,i} = \sum_{k=1}^{n} m_{Ei,k} \qquad \text{(C - 3)}$$

4) Masse des Pyrolysegases m_{Gas}:

$$m_{Gas} = \sum_{k=1}^{n} m_k \qquad \text{(C - 4)}$$

5) Masseanteil des jeweiligen Elementes im Pyrolysegas $x_{Ei,Gas}$:

$$x_{E,Gas} = \frac{m_{E,i}}{m_{Gas}} \cdot 100\,\% \qquad in\ Ma.-\% \qquad \text{(C - 5)}$$

Die für die Berechnungen benötigten Dichten und Molmassen der Pyrolysegasbestandteile sind in Tab Anhang C - 1 zusammengefasst.

Tab Anhang C - 1: Stoffdaten der Gaskomponenten nach /DIN 51871/ und /DIN 1871/

Gaskomponente	Molmasse	Brennwert	Heizwert	Dichte
		H_O (25 °C)	H_U (25 °C)	
	in kg/kmol	*in MJ/kmol*		*in kg/m³i.N.*
H_2	2,02	285,83	241,81	0,090
Methan	16,04	890,63	802,60	0,718
CO	28,01	282,98	282,98	1,251
CO_2	44,01	-	-	1,977
Ethin	26,04	1.301,05	1.257,03	1,177
H_2S	34,08	562,01	517,99	1,536
COS	60,08	548,23	548,23	2,721
Propin	40,07		1.855,08	1,830
Ethan	30,07	1.560,69	1.428,64	1,355
Ethen	28,05	1.411,18	1.323,15	1,261
Propan	44,10	2.058,02	2.043,11	2,010
Propen	42,08	2.219,17	1.925,97	1,914
i-Butan	58,12	2.868,20	2.648,12	2,696
N-Butan	58,12	2.877,40	2.657,32	2,709

Die Berechnung der Normdichte des Pyrolysegases erfolgte aus den Normdichten der Einzelgase über die Mischungsregel s. Gleichung (C - 6):

$$\rho_{Gas} = \sum_{i=1}^{n} v_i \cdot \rho_i \qquad in\ kJ / m^3\ i.N. \qquad \text{(C - 6)}$$

Der Brennwert des Pyrolysegases im Normzustand wurde über die Mischungsregel aus den Anteilen und Brennwerten der einzelnen Gaskomponenten (s. Tab Anhang C - 1) nach Gleichung (C - 7) berechnet. Die Heizwertberechnung erfolgt analog über die Heizwerte der einzelnen Gaskomponenten.

$$H_{O,Gas} = \sum_{i=1}^{n} v_i \cdot H_{O,i} \qquad in\ MJ / kmol \qquad \text{(C - 7)}$$

Die Umrechnung des Brennwertes auf kJ/kg bzw. kJ/m^3 i.N. wurde durch Bezug auf die Molmasse bzw. die Normdichte vorgenommen.

Versuchspläne für die Untersuchungen in der Laborpyrolyseanlage

Tab Anhang C - 2: Versuchsplan zum Temperatureinfluss auf die Pyrolyse verschiedener Biomassen in der Laborpyrolyseanlage

Rohstoff	IEC-Nr.	Temperatur in °C											
		200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750
Sägerestholz (Fichte, rindenfrei)	2276	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Waldrestholz (Fichte mit Rinde	2472	-	x	x	x	x	-	x	-	x	-	x	-
Sägerestholz (Buche, rindenfrei)	2309	-	-	x	x	x	-	x	-	x	-	x	-
Pappel (Kurzumtrieb)	2469	-	-	x	-	x	-	x	-	x	-	x	-
Weizenstroh	2275	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Weizenstroh, grau	2297	-	x	x	-	x	-	x	-	x	-	x	-
Rapsstroh	2386	-	-	x	-	x	-	x	-	x	-	x	-
Landschaftspflegeheu	2480	-	-	x	-	x	-	x	-	x	-	x	-
Triticale-GP	2471	-	-	x	x	x	-	x	-	x	-	x	-
Maissilage	2475	-	x	x	x	x	-	x	-	x	-	x	-
Roggen-GPS	2473	-	-	x	-	x	-	x	-	x	-	x	-
Grünschnittroggensilage	2474	-	x	x	-	x	-	x	-	x	-	x	-
Grassilage	2365	-	-	x	-	x	-	x	-	x	-	x	-
Fichtesulfitzellstoff	2621	-	x	x	x	x	-	x	-	x	-	x	-
Xylan (Senn)	-	-	x	-	-	x	-	-	-	-	-	x	-
Xylan (Birkenholz)	2664	-	x	x	-	-	-	x	-	-	-	x	-
Lignin, alkali	2623	-	-	-	-	x	-	x	-	-	-	x	-
Lignin, alkali	2665	-	-	x	-	x	-	x	-	-	-	x	-

Tab Anhang C - 3: Versuchsplan zum Einfluss des Drucks auf die Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2478) und Weizenstroh (2296) in der Fallrohrpyrolyseanlage bei 800 °C

Rohstoff	IEC-Nr.	Druck in bar						
		1	5	7	10	15	20	30
		Anzahl der Versuche n						
Sägerestholz (Fichte, rindenfrei)	2478	n=5	n=2	n=1	n=2	n=2	n=1	n=1
Weizenstroh	2296	n=1	n=1	n=1	n=1	n=1	n=2	n=2

Tab Anhang C - 4: Versuchsplan zum Einfluss der Aufheizgeschwindigkeit auf die Pyrolyse verschiedener Biomassen in der Laborpyrolyseanlage

Rohstoff	IEC-Nr.	Aufheizrate in K/min			
		5	10	20	Schnell
Sägerestholz (Fichte, rindenfrei)	2276	500 °C			
Triticale-GP	2471				
Maissilage	2475				
Waldrestholz mit Rinde	2472	400 / 500 °C			
Weizenstroh	2275				

Tab Anhang C - 5: Versuchsplan zum für die Pyrolyse von Biomassemischungen in der Laborpyrolyseanlage

Pyrolysetemperatur:	500 °C
Aufheizrate:	Schnell (auf 700 °C vorgeheizter Ofen)
Druck:	atmosphärisch
Anlage:	Festbettreaktor
Körnung:	< 2 mm

Biomasse 1	IEC-Nr.	Biomasse 2	IEC-Nr.	Zumischrate Biomasse 2
Sägerestholz (Fichte, rindenfrei)	2276	Maissilage	2475	0, 25, 50, 75, 100 Ma.-%
Waldrestholz (Fichte mit Rinde)	2472	Grünschnittroggensilage	2474	
		Weizenstroh	2275	

Versuchspläne für die thermoanalytischen Untersuchungen

Tab Anhang C - 6: Versuchsplan zum Druckeinfluss an der DMT-Hochdruckthermowaage

Rohstoff	IEC-Nr.	Aufheizrate in K/min	Druck in bar		
			1	10	30
Holzartige Biomassen					
Sägerestholz (Fichte, rindenfrei)	2276	10	x	x	x
Waldrestholz	2472	10	x	x	x
Sägerestholz (Buche, rindenfrei)	2309	10	x	x	x
Pappel (Kurzumtrieb)	2469	10	x	x	x
Halmgutartige Biomassen					
Weizenstroh	2296	10	x	x	x
Weizenstroh, grau	2297	10	x	x	x
Rapsstroh	2386	10	x	x	x
Landschaftspflegeheu	2480	10	x	x	x
Triticale-Ganzpflanze	2471	10	x	x	x
Grünschnittroggensilage	2474	10	x	x	x
Roggen-Ganzpflanzensilage	2473	10	x	x	x
Maissilage	2475	5	x	x	x
		10	x	x	x
		20	x	x	x

Tab Anhang C - 7: Versuchsplan für die Untersuchungen zur Reaktionsenthalpie bei der Pyrolyse mittels TG-DSC (Gerät: Netzsch STA 409 C)

Rohstoff	IEC-Nr.	Körnung in mm	Aufheizrate in K/min		
			10	20	40
Holzartige Biomassen					
Sägerestholz (Fichte, rindenfrei)	2276	< 2	-	x	-
Waldrestholz (Fichte mit Rinde)	2472	< 2	-	x	-
Sägerestholz (Buche, rindenfrei)	2309	< 2	-	x	-
Industrierestholz (Spanplatte)	2277	< 2	-	x	-
Pappel (Kurzumtrieb)	2469	< 2	-	x	-
Halmgutartige Biomassen					
Weizenstroh	2275	< 0,1	x	x	x
		< 2	x	x	x
		1-2	x	x	x
		5-6	x	x	x
Weizenstroh	2184	< 2	-	x	-
Weizenstroh	2296	< 2	-	x	-
Weizenstroh, grau	2279	< 2	-	x	-
Weizenstroh, grau	2297	< 2	-	x	-
Rapsstroh	2386	< 2	-	x	-
Triticale-Ganzpflanze	2471	< 2	-	x	-
Maissilage	2475	< 2	-	x	-
Maissilage	2364	< 2	-	x	-
Grünschnittroggensilage	2474	< 2	-	x	-
Roggen-GPS	2473	< 2	-	x	-
Gerste-GPS	2366	< 2	-	x	-
Grassilage	2365	< 2	-	x	-
Biopolymere					
Cellulose	2625	< 2	-	x	-
Fichte-Sulfitzellstoff	2621	< 2	-	x	-
Xylan (Senn)	-	< 2	-	x	-
Xylan (aus Birkenholz)	2664	< 2	-	x	-
Alkali-Lignin	2623	< 2	-	x	-
Organosolv-Lignin	2624	< 2	-	x	-

Korngrößenanalyse (Siebanalyse) der in der Festbettpyrolyseanlage eingesetzten Rohstoffe (< 2 mm)

Tab Anhang C - 8: Ergebnisse der Korngrößenanalyse der Fraktion < 2 mm aus der Schneidmühle für die holzartigen Biomassen

Partikelgrößenklasse	Mittlere Kornabmessung	Sägerestholz (Fichte, rindenfrei)		Waldrestholz (Fichte mit Rinde)		Sägerestholz (Buche, rindenfrei)		Pappel (Kurzumtrieb)	
in mm	in mm	2276		2472		2309		2469	
Angaben in Ma.%		Anteil	Summe	Anteil	Summe	Anteil	Summe	Anteil	Summe
> 1,6	1,300	0,65	100,00	0,62	100,00	0,45	100,00	2,75	100,00
1,0 - 1,6	0,900	26,97	99,35	25,04	99,38	30,90	99,55	42,16	97,25
0,8 - 1	0,715	12,24	72,38	6,82	74,33	12,54	68,65	5,46	55,09
0,63 - 0,8	0,565	26,98	60,14	26,75	67,51	26,31	56,11	21,35	49,63
0,5 - 0,63	0,408	10,20	33,16	4,80	40,76	7,15	29,80	3,95	28,28
0,315 - 0,5	0,258	12,21	22,96	12,75	35,96	11,26	22,66	9,88	24,33
0,2 - 0,315	0,150	5,51	10,76	7,77	23,21	5,74	11,40	5,84	14,46
0,1 - 0,2	0,075	3,15	5,25	7,63	15,44	3,91	5,66	5,55	8,62
< 0,1	0,025	2,10	2,10	7,81	7,81	1,75	1,75	3,07	3,07

Tab Anhang C - 9: Ergebnisse der Korngrößenanalyse der Fraktion < 2 mm aus der Schneidmühle für die halmgutartigen Biomassen

Partikelgrößenklasse	Mittlere Kornabmessung	Weizenstroh		Rapsstroh		Triticale-Ganzpflanze	
in mm	in mm	2275		2386		2471	
Angaben in Ma.%		Anteil	Summe	Anteil	Summe	Anteil	Summe
> 1,6	1,300	0,91	100,00	1,94	100,00	0,52	100,00
1,0 - 1,6	0,900	32,20	99,09	40,30	98,06	21,15	99,48
0,8 - 1	0,715	9,14	66,89	6,90	57,75	13,39	78,33
0,63 - 0,8	0,565	22,02	57,75	20,22	50,85	22,50	64,93
0,5 - 0,63	0,408	8,17	35,73	3,76	30,63	6,57	42,43
0,315 - 0,5	0,258	12,23	27,56	12,12	26,88	12,69	35,87
0,2 - 0,315	0,150	7,67	15,33	6,32	14,76	10,82	23,18
0,1 - 0,2	0,075	4,63	7,66	5,12	8,44	7,77	12,35
< 0,1	0,025	3,03	3,03	3,32	3,32	4,59	4,59

Tab Anhang C - 10: Ergebnisse der Korngrößenanalyse der Fraktion < 2 mm aus der Schneidmühle für die Silagen

Partikelgrößenklasse	Mittlere Kornabmessung	Roggen-Ganzpflanzensilage		Grünschnittroggensilage		Maissilage	
in mm	in mm	2473		2474		2475	
Angaben in Ma.%		Anteil	Summe	Anteil	Summe	Anteil	Summe
> 1,6	1,300	0,19	100,00	1,01	100,00	0,69	100,00
1,0 - 1,6	0,900	4,98	99,81	23,39	98,99	29,57	99,31
0,8 - 1	0,715	6,89	94,83	8,58	75,60	11,66	69,74
0,63 - 0,8	0,565	22,04	87,94	16,56	67,02	18,04	58,08
0,5 - 0,63	0,408	7,67	65,90	6,90	50,47	7,32	40,03
0,315 - 0,5	0,258	26,07	58,23	16,95	43,56	11,94	32,72
0,2 - 0,315	0,150	16,44	32,16	11,43	26,61	8,38	20,77
0,1 - 0,2	0,075	9,48	15,72	11,10	15,18	6,41	12,39
< 0,1	0,025	6,24	6,24	4,09	4,09	5,98	5,98

Anhang D Ergebnisse zum Einfluss der Temperatur auf die Biomassepyrolyse

Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) im Festbettreaktor unter Variation der Temperatur (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung)

Tab Anhang D - 1: Produktverteilung bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	308	316	356	380	403	419	468	506	553	600	653	704	750
Aufheizrate in K/min	40	43	45	38	53	67	77	74	82	94	104	109	109
Ausbeuten						in Ma.-% (wf)							
Koks	80,2	74,3	53,2	39,6	32,8	29,7	26,8	25,3	23,5	22,0	20,4	21,0	21,4
Kondensat	15,5	19,3	38,8	50,0	56,9	58,4	60,8	61,0	62,3	62,2	61,1	61,5	57,9
Teer/Öl	7,1	9,8	23,0	31,4	35,5	38,7	41,4	41,8	42,8	42,0	41,8	40,6	36,2
Zersetzungswasser	8,4	9,5	15,8	18,6	21,3	19,7	19,4	19,2	19,6	20,2	19,2	20,8	21,7
Gas	4,3	6,4	8,0	10,5	10,4	11,8	12,4	13,7	14,1	15,9	18,5	17,5	20,7
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Ausbeuten						in Ma.-% (waf)							
Koks	80,1	74,2	53,0	39,4	32,5	29,5	26,5	25,1	23,3	21,7	20,1	20,7	21,2
Kondensat	15,5	19,4	38,9	50,1	57,1	58,6	61,0	61,2	62,6	62,4	61,3	61,7	58,1
Teer/Öl	7,1	9,9	23,2	31,5	35,7	39,0	41,7	42,1	43,1	42,3	42,2	40,9	36,4
Zersetzungswasser	8,4	9,5	15,7	18,6	21,3	19,7	19,3	19,1	19,5	20,1	19,1	20,7	21,7
Gas	4,3	6,4	8,1	10,5	10,4	11,9	12,5	13,7	14,2	15,9	18,6	17,6	20,7
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang D - 2: Produktzusammensetzung bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	308	316	356	380	403	419	468	506	553	600	653	704	750
Aufheizrate in K/min	40	43	45	38	53	67	77	74	82	94	104	109	109
Koks						in Ma.-% (wf)							
A	0,4	0,4	0,6	0,8	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,6	1,5
FB	77,6	74,9	61,5	46,1	35,4	32,5	26,3	23,9	19,6	14,9	10,9	8,2	7,0
Cfix	22,0	24,7	37,9	53,0	63,6	66,4	72,5	74,8	79,0	83,6	87,5	90,2	91,5
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
C	56,1	57,5	65,0	73,5	79,7	78,1	80,6	82,1	85,8	88,3	90,6	92,4	93,4
H	5,8	5,7	5,3	4,9	4,3	4,2	3,7	3,5	3,3	2,9	2,6	2,3	1,9
N	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3
O+SC	37,7	36,3	29,0	20,5	14,8	16,3	14,2	12,9	9,3	7,0	5,0	3,5	2,9
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Pyrolysegas						in Ma.-% (wf)							
C	31,2	31,6	32,2	33,0	33,4	34,5	35,7	36,0	36,7	37,7	37,9	39,0	38,5
H	0,1	0,1	0,2	0,3	0,7	1,0	1,5	1,7	1,9	2,6	2,7	3,7	3,7
N	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
O+SC	68,7	68,3	67,6	66,7	65,9	64,5	62,8	62,3	61,4	59,7	59,4	57,3	57,8
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Kondensat, gesamt						in Ma.-% (wf)							
A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C	28,0	30,4	34,7	36,2	37,1	39,9	40,5	40,9	40,6	40,6	41,2	39,7	39,2
H	9,5	9,8	8,5	8,3	8,1	8,1	8,1	8,2	8,1	8,1	8,3	8,1	8,5
N	1,2	0,9	0,5	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
O+SC	61,3	58,9	56,3	55,2	54,5	51,6	51,1	50,6	51,0	51,0	50,2	51,9	52,0
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Teer/Öl						in Ma.-% (wf)							
A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C	61,2	59,7	58,6	57,7	59,3	60,3	59,5	59,7	59,1	60,2	60,1	60,1	62,6
H	7,5	8,4	6,6	6,5	6,3	6,5	6,6	6,8	6,7	6,7	7,0	6,5	7,0
N	2,6	1,8	0,8	0,5	0,5	0,4	0,4	0,5	0,5	0,4	0,4	0,5	0,5
O+SC	28,7	30,1	34,0	35,3	33,9	32,7	33,4	33,1	33,7	32,7	32,5	32,9	29,9
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Zersetzungswasser						in Ma.-% (wf)							
H	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2
O	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang D - 3: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff enthaltenen Elemente auf die Produkte bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	308	316	356	380	403	419	468	506	553	600	653	704	750
Aufheizrate in K/min	40	43	45	38	53	67	77	74	82	94	104	109	109
C-Verteilung						in %							
Koks	88,8	84,4	68,3	57,4	51,5	45,8	42,6	41,0	39,8	38,3	36,5	38,3	39,5
Kondensat, gesamt	8,6	11,6	26,6	35,7	41,6	46,1	48,6	49,3	49,9	49,9	49,6	48,2	44,8
Zersetzungswasser	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Teer/Öl	8,6	11,6	26,6	35,7	41,6	46,1	48,6	49,3	49,9	49,9	49,6	48,2	44,8
Gas	2,7	4,0	5,1	6,8	6,8	8,1	8,8	9,7	10,2	11,8	13,9	13,5	15,7
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
H-Verteilung						in %							
Koks	75,9	69,0	46,0	32,0	23,1	20,7	16,4	14,6	12,8	10,6	8,6	7,9	6,5
Kondensat, gesamt	24,1	30,9	53,7	67,5	75,7	77,5	80,5	81,7	82,8	82,7	83,1	81,5	80,9
Zersetzungswasser	15,4	17,3	28,9	34,0	39,1	36,1	35,6	35,2	35,8	37,0	35,2	38,1	39,7
Teer/Öl	8,7	13,6	24,8	33,5	36,7	41,4	45,0	46,5	46,9	45,7	47,8	43,4	41,2
Gas	0,1	0,1	0,2	0,5	1,2	1,9	3,0	3,7	4,4	6,7	8,3	10,6	12,6
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
N-Verteilung						in %							
Koks	22,7	25,8	20,8	32,5	28,1	25,8	21,0	19,5	17,4	21,7	21,0	21,7	26,8
Kondensat, gesamt	77,3	74,2	79,2	67,5	71,9	74,2	79,0	80,5	82,6	78,3	79,0	78,3	73,2
Zersetzungswasser	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Teer/Öl	77,3	74,2	79,2	67,5	71,9	74,2	79,0	80,5	82,6	78,3	79,0	78,3	73,2
Gas	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
O(+SC)-Verteilung						in %							
Koks	70,8	63,1	36,1	19,0	11,3	11,4	8,9	7,6	5,1	3,6	2,4	1,7	1,4
Kondensat, gesamt	22,3	26,6	51,2	64,6	72,6	70,7	72,8	72,4	74,5	74,2	71,9	74,7	70,6
Zersetzungswasser	17,5	19,7	32,8	38,7	44,4	41,0	40,4	40,0	40,7	42,0	40,0	43,3	45,2
Teer/Öl	4,8	6,9	18,3	25,9	28,2	29,7	32,4	32,4	33,8	32,2	31,8	31,4	25,4
Gas	6,9	10,2	12,7	16,4	16,0	17,9	18,3	20,0	20,3	22,2	25,8	23,5	28,0
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang D - 4: Energieinhalte der Produkte und „Reaktionsenthalpie“ bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	308	316	356	380	403	419	468	506	553	600	653	704	750
Aufheizrate in K/min	40	43	45	38	53	67	77	74	82	94	104	109	109
Koks						in kJ/kg (wf)							
Brennwert	22.395	22.981	25.631	28.987	29.783	30.061	30.676	31.079	32.182	33.154	33.636	34.148	33.698
Heizwert	21.134	21.742	24.477	27.909	28.842	29.134	29.859	30.310	31.455	32.510	33.073	33.648	33.293
Pyrolysegas						in kJ/kg (wf)							
Brennwert	2.640	2.904	3.359	4.009	4.618	5.583	6.845	7.194	7.915	9.276	9.619	11.520	11.272
Heizwert	2.631	2.893	3.336	3.971	4.524	5.449	6.628	6.949	7.627	8.869	9.179	10.874	10.620
Kondensat, gesamt						in kJ/kg (wf)							
Brennwert	14.794	15.254	17.313	16.971	17.553	20.236	18.845	19.405	19.117	18.958	18.704	18.435	17.981
Heizwert	12.575	13.115	15.260	15.033	15.594	18.175	16.916	17.467	17.178	17.006	16.805	16.484	15.973
Teer/Öl						in kJ/kg (wf)							
Brennwert	29.435	27.559	27.514	25.573	26.629	29.285	26.546	27.200	26.740	26.903	26.182	26.630	27.290
Heizwert	27.479	25.712	25.727	23.934	24.960	27.419	24.859	25.494	25.031	25.188	24.532	24.930	25.542
Zersetzungswasser						in kJ/kg (wf)							
Brennwert	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442
Heizwert	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\Delta_R H_{Chem}$ (P-BM)						in kJ/kg (wf)							
Brennwert	655	494	906	656	506	1.711	812	980	893	832	357	811	250
Heizwert	633	494	827	590	408	1.549	727	903	806	746	334	727	200
Koks						in kJ/kg (waf)							
Brennwert	22.488	23.083	25.791	29.231	30.086	30.399	31.059	31.490	32.640	33.659	34.189	34.695	34.226
Heizwert	21.222	21.839	24.629	28.144	29.136	29.461	30.232	30.711	31.903	33.006	33.617	34.187	33.815
$\Delta_R H_{Chem}$ (P-BM)						in kJ/kg (waf)							
Brennwert	657	502	935	666	532	1.747	869	1.025	929	874	404	851	276
Heizwert	635	501	857	601	434	1.585	785	949	843	789	382	767	226

Tab Anhang D - 5: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff chemisch gebundenen Energie auf die Produkte bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	308	316	356	380	403	419	468	506	553	600	653	704	750
Aufheizrate in K/min	40	43	45	38	53	67	77	74	82	94	104	109	109
Koks						in % (wf)							
Brennwert	91,1	86,6	69,2	58,2	49,5	45,3	41,7	39,9	38,4	37,0	34,8	36,4	36,6
Heizwert	92,2	87,9	70,8	60,1	51,4	47,1	43,5	41,7	40,2	38,9	36,7	38,4	38,8
Pyrolysegas						in % (wf)							
Brennwert	0,6	0,9	1,4	2,1	2,4	3,4	4,3	5,0	5,7	7,5	9,0	10,2	11,8
Heizwert	0,6	1,0	1,5	2,3	2,6	3,5	4,5	5,2	5,9	7,6	9,3	10,4	11,9
Kondensat, gesamt						in % (wf)							
Brennwert	11,6	14,9	34,1	43,0	50,6	60,0	58,1	60,1	60,5	59,8	57,9	57,5	52,8
Heizwert	10,6	13,8	32,2	40,9	48,3	57,8	56,0	58,0	58,3	57,5	55,8	55,1	50,3
Teer/Öl						in % (wf)							
Brennwert	10,6	13,8	32,1	40,7	48,0	57,5	55,7	57,7	58,0	57,3	55,6	54,9	50,1
Heizwert	10,6	13,8	32,2	40,9	48,3	57,8	56,0	58,0	58,3	57,5	55,8	55,1	50,3
Zersetzungswasser						in % (wf)							
Brennwert	1,0	1,2	2,0	2,3	2,6	2,4	2,4	2,4	2,4	2,5	2,4	2,6	2,7
Heizwert	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
$\Delta_R H_{Chem}$ (P-BM)						in % (wf)							
Brennwert	3,3	2,5	4,6	3,3	2,6	8,7	4,1	5,0	4,5	4,2	1,8	4,1	1,3
Heizwert	3,4	2,7	4,5	3,2	2,2	8,4	4,0	4,9	4,4	4,1	1,8	4,0	1,1

Tab Anhang D - 6: Gaszusammensetzung, Ausbeuten der Gaskomponenten und Gasdichte bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	308	316	356	380	403	419	468	506	553	600	653	704	750
Aufheizrate in K/min	40	43	45	38	53	67	77	74	82	94	104	109	109
Gaszusammensetzung						in Vol.-%							
H2	0,60	0,66	1,00	0,87	1,69	0,97	1,14	1,62	2,22	4,76	6,61	11,99	13,63
Methan	0,34	0,48	0,91	1,77	4,38	6,76	10,28	10,97	12,33	14,97	14,53	16,56	15,77
CO	33,99	36,69	39,56	43,88	40,04	43,28	42,76	41,67	43,34	40,87	40,69	38,07	36,13
CO2	65,04	62,15	58,38	53,25	53,32	48,27	44,63	44,24	40,65	37,53	36,12	31,08	32,29
Ethin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H2S	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
COS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Propin	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00
Ethan	0,00	0,00	0,06	0,09	0,28	0,39	0,68	0,80	0,84	0,94	0,95	0,98	0,97
Ethen	0,00	0,00	0,05	0,09	0,10	0,23	0,37	0,40	0,45	0,49	0,49	0,80	0,52
Propan	0,02	0,01	0,02	0,03	0,08	0,09	0,12	0,14	0,16	0,20	0,20	0,20	0,22
Propen	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,14	0,00	0,21	0,39	0,30	0,43
i-Butan	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01
N-Butan	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02
Summe	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Gasausbeute						in l i.N./kg (wf)							
H2	0,15	0,25	0,49	0,56	1,08	0,74	0,94	1,50	2,15	5,53	9,00	16,79	22,80
Methan	0,09	0,18	0,44	1,15	2,86	5,15	8,47	9,96	11,96	17,03	19,73	23,15	26,25
CO	8,56	13,87	19,15	28,41	26,00	32,94	35,21	37,88	42,08	46,44	55,19	53,17	59,60
CO2	16,37	23,49	28,27	34,47	34,63	36,75	36,74	40,44	39,46	42,76	49,08	43,47	53,44
Ethin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
H2S	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
COS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Propin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00
Ethan	0,00	0,00	0,03	0,06	0,18	0,30	0,56	0,73	0,82	1,07	1,29	1,38	1,62
Ethen	0,00	0,00	0,02	0,06	0,06	0,17	0,30	0,37	0,44	0,56	0,67	1,12	0,87
Propan	0,01	0,00	0,01	0,02	0,05	0,07	0,10	0,13	0,15	0,23	0,27	0,28	0,37
Propen	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00	0,00	0,14	0,00	0,26	0,53	0,42	0,72
i-Butan	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02
N-Butan	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,02	0,02	0,04
Summe	25,17	37,80	48,42	64,73	64,94	76,12	82,33	91,15	97,07	113,92	135,80	139,81	165,71
Gasdichte in kJ/m³ i.N.	1,71	1,69	1,66	1,62	1,60	1,55	1,51	1,50	1,46	1,39	1,36	1,25	1,25

Pyrolyse von Weizenstroh (2275) im Festbettreaktor unter Variation der Temperatur (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung)

Tab Anhang D - 7: Produktverteilung bei der Weizenstrohpyrolyse (2275) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	210	255	284	312	326	406	460	508	552	602	650	700	750
Aufheizrate in K/min	26	34	34	44	46	65	82	80	90	98	114	116	74
Ausbeuten						in Ma.-% (wf)							
Koks	95,5	79,8	68,1	47,1	44,1	36,7	33,6	32,4	31,3	30,2	29,6	29,0	30,8
Kondensat	4,1	16,1	22,8	37,6	42,1	44,3	46,3	47,3	47,4	45,7	49,1	46,6	45,0
Teer/Öl	-	8,0	10,7	20,2	22,6	27,9	25,3	27,3	27,5	26,0	28,2	26,7	24,3
Zersetzungswasser	-	8,1	12,1	17,5	19,6	16,4	21,0	20,0	20,0	19,8	20,8	19,9	20,6
Gas	0,4	4,1	9,1	15,2	13,8	19,0	20,1	20,2	21,3	24,1	21,4	24,4	24,2
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Ausbeuten						in Ma.-% (waf)							
Koks	95,1	78,0	65,3	42,4	39,2	31,1	27,7	26,4	25,2	24,0	23,3	22,7	24,7
Kondensat	4,4	17,5	24,8	41,0	45,9	48,2	50,4	51,5	51,6	49,8	53,4	50,8	48,9
Teer/Öl	-	8,7	11,6	22,0	24,6	30,4	27,5	29,7	29,9	28,3	30,7	29,1	26,5
Zersetzungswasser	-	8,8	13,2	19,0	21,3	17,8	22,9	21,8	21,7	21,5	22,7	21,7	22,5
Gas	0,4	4,5	9,9	16,6	15,0	20,7	21,9	22,0	23,2	26,2	23,3	26,5	26,4
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang D - 8: Produktzusammensetzung bei der Weizenstrohpyrolyse (2275) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	210	255	284	312	326	406	460	508	552	602	650	700	750
Aufheizrate in K/min	26	34	34	44	46	65	82	80	90	98	114	116	74
Koks						in Ma.-% (wf)							
A	8,5	10,2	12,0	17,3	18,5	22,2	24,3	25,1	26,1	27,0	27,6	28,1	26,4
FB	72,3	65,7	59,5	39,9	36,1	26,5	22,0	19,8	14,5	12,4	12,2	10,1	7,4
Cfix	19,1	24,1	28,5	42,8	45,4	51,3	53,7	55,0	59,4	60,6	60,3	61,8	66,2
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
C	46,7	49,3	53,4	60,9	62,0	63,9	65,2	66,1	67,6	68,6	68,4	69,5	68,9
H	5,5	5,4	5,0	4,4	4,2	3,5	3,0	2,7	2,3	2,0	1,7	1,4	1,0
N	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,6	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7
O+SC	38,8	34,5	29,0	16,8	14,6	9,7	6,8	5,4	3,3	1,8	1,7	0,4	2,9
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Pyrolysegas						in Ma.-% (wf)							
C	30,4	32,0	33,3	31,7	32,6	32,0	33,0	33,4	34,1	34,5	34,8	34,7	34,9
H	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,3	0,8	1,1	1,5	2,1	2,5	2,6	3,5
N	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
O+SC	69,5	68,0	66,7	68,3	67,3	67,7	66,2	65,6	64,4	63,4	62,7	62,6	61,6
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Kondensat, gesamt						in Ma.-% (wf)							
A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C	21,7	30,3	27,0	32,1	32,6	36,2	36,8	36,7	36,1	36,2	36,5	36,4	35,3
H	8,4	7,9	9,5	9,3	8,8	9,6	9,5	9,5	9,5	9,7	9,2	9,7	9,8
N	2,4	1,0	0,9	0,8	0,7	0,8	0,9	0,8	0,9	1,0	0,9	1,0	0,9
O+SC	67,5	60,7	62,5	57,8	57,9	53,4	52,8	52,9	53,4	53,1	53,4	52,9	54,0
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Teer/Öl						in Ma.-% (wf)							
A	-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C	-	60,8	57,6	59,9	60,9	57,4	67,4	63,7	62,4	63,8	63,5	63,5	65,2
H	-	4,7	7,6	7,6	6,6	8,6	8,1	8,2	8,3	8,6	7,8	8,6	8,7
N	-	2,1	2,0	1,5	1,4	1,3	1,6	1,5	1,6	1,7	1,6	1,7	1,7
O+SC	-	32,4	32,8	31,0	31,1	32,7	22,9	26,6	27,7	25,9	27,2	26,2	24,4
Summe	-	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Zersetzungswasser						in Ma.-% (wf)							
H	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2
O	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang D - 9: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff enthaltenen Elemente auf die Produkte bei der Pyrolyse von Weizenstrohpyrolyse (2275) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	210	255	284	312	326	406	460	508	552	602	650	700	750
Aufheizrate in K/min	26	34	34	44	46	65	82	80	90	98	114	116	74
C-Verteilung							in %						
Koks	97,8	86,4	79,9	62,9	60,0	51,5	48,1	47,0	46,5	45,5	44,4	44,2	46,6
Kondensat, gesamt	1,9	10,7	13,5	26,5	30,1	35,1	37,4	38,2	37,6	36,4	39,3	37,2	34,8
Zersetzungswasser	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Teer/Öl	1,9	10,7	13,5	26,5	30,1	35,1	37,4	38,2	37,6	36,4	39,3	37,2	34,8
Gas	0,3	2,9	6,6	10,6	9,9	13,3	14,6	14,8	15,9	18,2	16,3	18,6	18,6
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
H-Verteilung							in %						
Koks	93,8	77,1	61,0	37,1	33,5	22,9	18,3	15,6	13,1	11,1	9,2	7,4	5,6
Kondensat, gesamt	6,2	22,9	38,9	62,7	66,2	76,0	78,8	80,5	81,1	79,8	81,3	81,1	79,4
Zersetzungswasser	-	16,2	24,3	35,1	39,3	32,9	42,2	40,3	40,1	39,7	41,9	40,0	41,5
Teer/Öl	-	6,7	14,6	27,6	26,9	43,1	36,6	40,3	40,9	40,1	39,4	41,1	37,9
Gas	0,0	0,0	0,1	0,2	0,3	1,1	2,9	3,9	5,8	9,1	9,5	11,5	15,1
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
N-Verteilung							in %						
Koks	84,4	73,6	65,9	51,9	51,4	40,8	34,2	36,5	31,6	30,2	29,3	26,8	34,0
Kondensat, gesamt	15,6	26,4	34,1	48,1	48,6	59,2	65,8	63,5	68,4	69,8	70,7	73,2	66,0
Zersetzungswasser	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Teer/Öl	15,6	26,4	34,1	48,1	48,6	59,2	65,8	63,5	68,4	69,8	70,7	73,2	66,0
Gas	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
O(+SC)-Verteilung							in %						
Koks	92,4	68,6	49,3	19,7	16,0	8,9	5,7	4,4	2,6	1,3	1,3	0,3	2,2
Kondensat, gesamt	6,9	24,4	35,6	54,3	60,8	59,0	61,0	62,5	63,2	60,6	65,3	61,6	60,5
Zersetzungswasser	-	17,9	26,8	38,8	43,4	36,3	46,6	44,4	44,2	43,8	46,2	44,1	45,7
Teer/Öl	-	6,5	8,8	15,6	17,5	22,7	14,4	18,1	19,0	16,8	19,1	17,5	14,8
Gas	0,7	7,0	15,1	26,0	23,1	32,1	33,2	33,1	34,2	38,1	33,4	38,1	37,2
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang D - 10: Energieinhalte der Produkte und „Reaktionsenthalpie“ bei der Pyrolyse von Weizenstrohpyrolyse (2275) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	210	255	284	312	326	406	460	508	552	602	650	700	750
Aufheizrate in K/min	26	34	34	44	46	65	82	80	90	98	114	116	74
Koks							in kJ/kg (wf)						
Brennwert	18.436	19.559	20.899	23.878	24.429	24.558	24.414	24.690	25.064	25.250	24.906	25.064	24.327
Heizwert	17.243	18.386	19.800	22.923	23.504	23.801	23.751	24.106	24.553	24.805	24.530	24.754	24.108
Pyrolysegas							in kJ/kg (wf)						
Brennwert	2.163	3.052	3.932	2.903	3.549	3.358	4.392	4.907	5.855	6.762	7.499	7.672	9.033
Heizwert	2.150	3.050	3.927	2.894	3.536	3.317	4.287	4.763	5.645	6.456	7.119	7.264	8.436
Kondensat, gesamt							in kJ/kg (wf)						
Brennwert	-	-	16.059	16.713	16.793	16.811	17.107	15.500	18.043	18.108	18.387	18.223	17.257
Heizwert	-	-	13.911	14.594	14.590	14.800	14.842	13.559	15.940	15.987	16.230	16.090	15.108
Teer/Öl							in kJ/kg (wf)						
Brennwert	-	-	31.475	29.089	29.241	25.247	29.298	25.083	29.388	30.019	30.169	29.978	29.834
Heizwert	-	-	29.659	27.250	27.245	23.489	27.182	23.511	27.531	28.140	28.222	28.074	27.933
Zersetzungswasser							in kJ/kg (wf)						
Brennwert	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442
Heizwert	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\Delta_R H_{Chem}$ (P-BM)							in kJ/kg (wf)						
Brennwert	-	-	318	44	398	-837	-935	-1.602	-291	-401	52	-302	-492
Heizwert	-	-	293	10	276	-799	-1.012	-1.524	-278	-365	16	-272	-456
Koks							in kJ/kg (waf)						
Brennwert	20.158	21.786	23.740	28.878	29.969	31.565	32.239	32.982	33.894	34.584	34.382	34.868	33.074
Heizwert	18.853	20.479	22.492	27.722	28.835	30.592	31.364	32.203	33.204	33.974	33.863	34.437	32.775
$\Delta_R H_{Chem}$ (P-BM)							in kJ/kg (waf)						
Brennwert	-	-	346	48	434	-911	-1.018	-1.744	-317	-437	56	-329	-536
Heizwert	-	-	319	10	300	-869	-1.102	-1.659	-303	-398	17	-296	-496

Tab Anhang D - 11: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff chemisch gebundenen Energie auf die Produkte bei der Weizenstrohpyrolyse (2275) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	210	255	284	312	326	406	460	508	552	602	650	700	750
Aufheizrate in K/min	26	34	34	44	46	65	82	80	90	98	114	116	74
Koks						in % (wf)							
Brennwert	98,2	87,0	79,4	62,7	60,1	50,3	45,7	44,6	43,7	42,5	41,1	40,5	41,8
Heizwert	98,5	87,7	80,7	64,6	62,0	52,3	47,7	46,8	46,0	44,8	43,4	42,9	44,5
Pyrolysegas						in % (wf)							
Brennwert	0,0	0,7	2,0	2,5	2,7	3,6	4,9	5,5	6,9	9,1	8,9	10,4	12,2
Heizwert	0,1	0,8	2,1	2,6	2,9	3,8	5,2	5,8	7,2	9,3	9,1	10,6	12,2
Kondensat, gesamt						in % (wf)							
Brennwert	-	-	20,4	35,1	39,4	41,5	44,1	40,9	47,7	46,2	50,3	47,4	43,2
Heizwert	-	-	19,0	32,9	36,7	39,2	41,1	38,4	45,2	43,7	47,6	44,9	40,6
Teer/Öl						in % (wf)							
Brennwert	-	-	18,8	32,7	36,8	39,3	41,3	38,2	45,0	43,5	47,4	44,7	40,4
Heizwert	-	-	19,0	32,9	36,7	39,2	41,1	38,4	45,2	43,7	47,6	44,9	40,6
Zersetzungswasser						in % (wf)							
Brennwert	-	-	1,6	2,4	2,7	2,2	2,9	2,7	2,7	2,7	2,8	2,7	2,8
Heizwert	-	-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
$\Delta_R H_{chem}$ (P-BM)						in % (wf)							
Brennwert	-	-	1,8	0,2	2,2	-4,7	-5,2	-8,9	-1,6	-2,2	0,3	-1,7	-2,7
Heizwert	-	-	1,8	0,1	1,6	-4,8	-6,1	-9,1	-1,7	-2,2	0,1	-1,6	-2,7

Tab Anhang D - 12: Gaszusammensetzung, Ausbeuten der Gaskomponenten und Gasdichte bei der Weizenstrohpyrolyse (2275) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	210	255	284	312	326	406	460	508	552	602	650	700	750
Aufheizrate in K/min	26	34	34	44	46	65	82	80	90	98	114	116	74
Gaszusammensetzung						in Vol.-%							
H2	1,90	0,11	0,15	0,15	0,19	0,43	0,71	1,13	2,92	6,75	10,51	12,29	20,65
Methan	0,00	0,07	0,21	0,45	0,61	2,07	4,42	6,31	8,56	10,47	11,00	10,86	10,85
CO	27,64	40,17	49,25	36,88	43,20	35,24	33,14	31,97	31,51	27,29	27,36	26,57	24,28
CO2	70,41	59,61	50,35	62,40	55,81	61,79	59,99	58,66	54,82	52,99	48,83	48,02	42,18
Ethin	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
H2S	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
COS	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Propin	0,05	0,01	0,00	0,00	0,07	0,01	0,18	0,09	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00
Ethan	0,00	0,00	0,01	0,06	0,06	0,19	0,91	1,15	1,34	1,39	1,31	1,26	1,12
Ethen	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,07	0,22	0,30	0,35	0,32	0,30	0,29	0,25
Propan	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01	0,09	0,24	0,26	0,26	0,34	0,30	0,30	0,28
Propen	0,00	0,00	0,01	0,03	0,01	0,09	0,15	0,09	0,14	0,37	0,34	0,36	0,31
i-Butan	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01
N-Butan	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,01	0,05	0,03	0,03	0,05
Summe	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Gasausbeute						in l i.N./kg (wf)							
H2	0,04	0,03	0,08	0,14	0,16	0,48	0,85	1,40	3,95	10,75	15,66	21,35	39,50
Methan	0,00	0,02	0,12	0,41	0,50	2,33	5,36	7,82	11,53	16,68	16,40	18,84	20,75
CO	0,64	9,82	27,68	33,08	35,97	39,74	40,21	39,57	42,55	43,50	40,82	46,01	46,43
CO2	1,63	14,58	28,30	55,97	46,62	69,66	72,69	72,64	74,15	84,49	72,89	83,26	80,67
Ethin	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H2S	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
COS	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01
Propin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,01	0,23	0,11	0,10	0,01	0,00	0,01	0,00
Ethan	0,00	0,00	0,01	0,05	0,05	0,21	1,11	1,43	1,81	2,21	1,96	2,18	2,14
Ethen	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,08	0,27	0,37	0,47	0,51	0,44	0,50	0,48
Propan	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01	0,10	0,29	0,32	0,35	0,54	0,45	0,53	0,54
Propen	0,00	0,00	0,01	0,03	0,01	0,10	0,19	0,11	0,20	0,59	0,50	0,62	0,60
i-Butan	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02
N-Butan	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,02	0,01	0,07	0,04	0,05	0,09
Summe	2,32	24,45	56,21	89,69	83,40	112,74	121,23	123,81	135,13	159,40	149,21	173,38	191,26
Gasdichte in kJ/m^3 i.N.	1,74	1,68	1,61	1,70	1,65	1,68	1,66	1,63	1,57	1,51	1,43	1,41	1,27

Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) im Festbettreaktor unter Variation der Temperatur (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung)

Tab Anhang D - 13: Produktverteilung bei der Waldrestholzpyrolyse für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**258**	**318**	**335**	**371**	**399**	**422**	**505**	**603**	**702**
Aufheizrate in K/min	40	42	38	50	69	54	72	99	120
Ausbeuten	in Ma.-% (wf)								
Koks	91,7	70,9	58,4	45,0	41,4	37,3	31,3	28,4	26,6
Kondensat	7,2	23,2	33,1	45,4	49,0	49,1	51,5	52,0	52,8
Teer/Öl	3,8	11,6	18,6	-	31,0	32,8	33,7	33,1	33,9
Zersetzungswasser	3,4	11,6	14,5	-	18,0	16,3	17,8	19,0	18,9
Gas	1,1	6,0	8,4	9,6	9,6	13,6	17,3	19,5	20,6
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Ausbeuten	in Ma.-% (waf)								
Koks	91,6	70,4	57,8	44,2	40,6	36,4	30,2	27,4	25,5
Kondensat	7,3	23,5	33,6	46,1	49,7	49,8	52,2	52,8	53,6
Teer/Öl	3,8	11,7	18,9	-	31,4	33,3	34,2	33,6	34,4
Zersetzungswasser	3,5	11,8	14,7	-	18,3	16,5	18,0	19,2	19,2
Gas	1,1	6,0	8,6	9,7	9,7	13,8	17,5	19,8	20,9
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang D - 14: Produktzusammensetzung bei der Waldrestholzpyrolyse für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**258**	**318**	**335**	**371**	**399**	**422**	**505**	**603**	**702**
Aufheizrate in K/min	40	42	38	50	69	54	72	99	120
Koks					in Ma.-% (wf)				
A	1,6	2,0	2,5	3,2	3,5	3,9	4,6	5,1	5,4
FB	76,9	65,4	57,6	46,6	37,2	31,9	23,5	13,9	9,4
Cfix	21,5	32,5	39,9	50,2	59,3	64,2	71,8	81,0	85,1
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
C	53,2	60,2	64,0	69,6	73,2	72,8	80,4	84,4	85,8
H	5,6	5,4	5,2	4,7	4,4	3,9	3,3	2,7	2,2
N	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5
O+SC	39,3	32,1	28,0	22,1	18,6	19,1	11,3	7,3	6,1
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Pyrolysegas					in Ma.-% (wf)				
C	29,4	30,7	31,2	31,5	32,0	32,9	34,8	36,4	37,2
H	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,7	1,5	2,4	3,1
N	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
O+SC	70,5	69,2	68,6	68,3	67,7	66,4	63,7	61,3	59,7
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Kondensat, gesamt					in Ma.-% (wf)				
A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C	30,8	29,5	34,0	37,3	36,6	40,1	39,2	38,9	39,4
H	9,2	8,8	8,5	8,1	8,2	8,8	8,8	8,8	8,8
N	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
O+SC	59,7	61,6	57,3	54,3	55,1	50,9	51,8	52,1	51,6
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Teer/Öl					in Ma.-% (wf)				
A	0,0	0,0	0,0	-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C	58,7	59,2	60,4	-	57,9	60,0	59,8	61,1	61,4
H	7,3	6,3	6,3	-	6,4	7,6	7,6	7,5	7,4
N	0,6	0,3	0,4	-	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4
O+SC	33,3	34,2	32,8	-	35,4	32,1	32,2	31,1	30,8
Summe	100,0	100,0	100,0	-	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Zersetzungswasser					in Ma.-% (wf)				
H	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2
O	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang D - 15: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff enthaltenen Elemente auf die Produkte bei der Waldrestholzpyrolyse für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**258**	**318**	**335**	**371**	**399**	**422**	**505**	**603**	**702**
Aufheizrate in K/min	40	42	38	50	69	54	72	99	120
C-Verteilung					in %				
Koks	95,0	83,1	72,9	61,0	59,1	52,9	49,0	46,7	44,5
Kondensat, gesamt	4,3	13,3	21,9	33,1	35,0	38,3	39,3	39,4	40,6
Zersetzungswasser	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Teer/Öl	4,3	13,3	21,9	33,1	35,0	38,3	39,3	39,4	40,6
Gas	0,6	3,6	5,1	5,9	6,0	8,7	11,7	13,9	14,9
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
H-Verteilung					in %				
Koks	88,7	65,1	51,8	36,3	30,9	24,6	17,7	13,3	10,0
Kondensat, gesamt	11,3	34,8	48,0	63,4	68,5	73,7	77,8	78,8	79,2
Zersetzungswasser	6,6	22,3	27,8	-	34,6	31,3	34,0	36,3	36,3
Teer/Öl	4,7	12,5	20,2	-	33,9	42,5	43,8	42,4	42,9
Gas	0,0	0,1	0,2	0,3	0,6	1,7	4,5	7,9	10,8
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
N-Verteilung					in %				
Koks	90,4	84,9	67,1	57,3	65,2	56,1	53,4	59,9	51,6
Kondensat, gesamt	9,6	15,1	32,9	42,7	34,8	43,9	46,6	40,1	48,4
Zersetzungswasser	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Teer/Öl	9,6	15,1	32,9	42,7	34,8	43,9	46,6	40,1	48,4
Gas	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
O(+SC)-Verteilung					in %				
Koks	87,6	55,3	39,8	24,2	18,7	17,3	8,6	5,0	3,9
Kondensat, gesamt	10,5	34,7	46,1	59,9	65,6	60,8	64,7	65,9	66,2
Zersetzungswasser	7,4	25,1	31,3	-	38,9	35,2	38,3	40,9	40,9
Teer/Öl	3,1	9,6	14,9	-	26,6	25,6	26,4	25,0	25,4
Gas	1,9	10,0	14,1	15,9	15,7	22,0	26,7	29,1	29,8
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang D - 16: Energieinhalte der Produkte und „Reaktionsenthalpie“ bei der Waldrestholzpyrolyse für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**258**	**318**	**335**	**371**	**399**	**422**	**505**	**603**	**702**
Aufheizrate in K/min	40	42	38	50	69	54	72	99	120
Koks					in kJ/kg (wf)				
Brennwert	21.142	23.868	25.255	27.377	28.257	28.498	30.177	31.495	31.775
Heizwert	19.909	22.698	24.126	26.348	27.306	27.658	29.456	30.898	31.295
Pyrolysegas					in kJ/kg (wf)				
Brennwert	1.450	2.339	2.704	2.912	3.376	4.255	6.262	8.218	9.644
Heizwert	1.443	2.327	2.687	2.888	3.331	4.160	6.049	7.858	9.144
Kondensat, gesamt					in kJ/kg (wf)				
Brennwert	-	13.937	16.245	-	16.130	18.281	17.808	17.483	17.990
Heizwert	-	11.878	14.172	-	14.291	16.381	15.933	15.633	16.076
Teer/Öl					in kJ/kg (wf)				
Brennwert	-	25.499	26.970	-	24.104	26.158	25.902	26.103	26.682
Heizwert	-	23.826	25.183	-	22.616	24.526	24.326	24.591	25.064
Zersetzungswasser					in kJ/kg (wf)				
Brennwert	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442
Heizwert	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\Delta_R H_{Chem}$ (P-BM)					in kJ/kg (wf)				
Brennwert	-	131	211	-	-221	28	-474	-499	-210
Heizwert	-	97	136	-	-247	42	-428	-428	-178
Koks					in kJ/kg (waf)				
Brennwert	21.481	24.365	25.896	28.287	29.279	29.648	31.641	33.184	33.601
Heizwert	20.229	23.171	24.738	27.224	28.294	28.774	30.885	32.555	33.093
$\Delta_R H_{Chem}$ (P-BM)					in kJ/kg (waf)				
Brennwert	-	133	214	-	-224	28	-481	-506	-213
Heizwert	-	99	138	-	-251	42	-434	-435	-180

Tab Anhang D - 17: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff chemisch gebundenen Energie auf die Produkte bei der Waldrestholzpyrolyse für verschiedene Temperaturen (Körnung: < 2 mm, Festbett, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**258**	**318**	**335**	**371**	**399**	**422**	**505**	**603**	**702**
Aufheizrate in K/min	40	42	38	50	69	54	72	99	120
Koks					in % (wf)				
Brennwert	96,2	83,9	73,2	61,1	58,1	52,7	46,8	44,4	42,0
Heizwert	96,7	85,2	74,6	62,8	59,9	54,6	48,8	46,5	44,1
Pyrolysegas					in % (wf)				
Brennwert	0,1	0,7	1,1	1,4	1,6	2,9	5,4	8,0	9,8
Heizwert	0,1	0,7	1,2	1,5	1,7	3,0	5,5	8,1	10,0
Kondensat, gesamt					in % (wf)				
Brennwert	-	16,0	26,7	-	39,2	44,5	45,5	45,1	47,1
Heizwert	-	14,6	24,9	-	37,1	42,6	43,4	43,1	45,0
Teer/Öl					in % (wf)				
Brennwert	-	14,6	25,0	-	37,0	42,6	43,3	42,8	44,9
Heizwert	-	14,6	24,9	-	37,1	42,6	43,4	43,1	45,0
Zersetzungswasser					in % (wf)				
Brennwert	0,4	1,4	1,8	-	2,2	2,0	2,2	2,3	2,3
Heizwert	0,0	0,0	0,0	-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
$\Delta_R H_{Chem}$ (P-BM)					in % (wf)				
Brennwert	-	0,7	1,0	-	-1,1	0,1	-2,4	-2,5	-1,0
Heizwert	-	0,5	0,7	-	-1,3	0,2	-2,3	-2,3	-0,9

Tab Anhang D - 18: Gaszusammensetzung, Ausbeuten der Gaskomponenten und Gasdichte bei der Waldrestholzpyrolyse für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**258**	**318**	**335**	**371**	**399**	**422**	**505**	**603**	**702**
Aufheizrate in K/min	40	42	38	50	69	54	72	99	120
Gaszusammensetzung					in Vol.-%				
H2	0,23	0,77	1,06	0,75	1,00	1,06	1,87	5,76	10,17
Methan	0,10	0,38	0,58	1,14	2,26	4,56	9,56	12,92	14,50
CO	18,96	29,86	33,22	34,05	35,10	34,81	35,70	35,92	34,93
CO2	80,43	68,91	65,04	63,90	61,35	58,67	51,12	43,33	38,27
Ethin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H2S	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
COS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Propin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ethan	0,29	0,05	0,05	0,08	0,15	0,34	0,84	0,96	0,95
Ethen	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,12	0,36	0,47	0,51
Propan	0,00	0,01	0,01	0,03	0,05	0,10	0,21	0,21	0,20
Propen	0,00	0,02	0,02	0,04	0,07	0,34	0,34	0,42	0,45
i-Butan	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
N-Butan	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01
Summe	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Gasausbeute					in l i.N./kg (wf)				
H2	0,01	0,26	0,52	0,42	0,66	0,89	2,07	7,85	15,63
Methan	0,01	0,13	0,29	0,65	1,49	3,85	10,62	17,59	22,27
CO	1,15	10,22	16,43	19,23	23,19	28,88	39,67	48,92	53,63
CO2	4,88	23,58	32,17	36,09	40,52	48,53	56,81	59,01	58,74
Ethin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
H2S	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
COS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Propin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ethan	0,02	0,02	0,03	0,05	0,10	0,29	0,93	1,30	1,45
Ethen	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,10	0,40	0,63	0,78
Propan	0,00	0,00	0,01	0,01	0,03	0,08	0,23	0,29	0,31
Propen	0,00	0,01	0,01	0,02	0,05	0,27	0,37	0,58	0,69
i-Butan	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
N-Butan	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01
Summe	6,07	34,22	49,46	56,48	66,05	82,90	111,13	136,20	153,54
Gasdichte in kJ/m^3 i.N.	1,83	1,74	1,71	1,70	1,67	1,64	1,55	1,44	1,34

Pyrolyse von Sägerestholz (Buche rindenfrei, 2309) im Festbettreaktor unter Variation der Temperatur (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung)

Tab Anhang D - 19: Produktverteilung bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Buche rindenfrei, 2309) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**318**	**331**	**349**	**423**	**503**	**611**	**698**
Aufheizrate in K/min	45	44	55	60	85	119	140
Ausbeuten				in Ma.-% (wf)			
Koks	66,5	57,2	44,3	28,0	26,2	22,2	19,5
Kondensat	29,2	37,4	45,8	56,5	58,1	58,3	60,4
Teer/Öl	20,5	24,5	30,2	39,6	38,0	38,4	41,1
Zersetzungswasser	8,6	13,0	15,6	16,9	20,1	19,9	19,3
Gas	4,4	5,3	9,9	15,5	15,7	19,5	20,1
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Ausbeuten				in Ma.-% (waf)			
Koks	66,3	57,0	44,0	27,6	25,8	21,7	19,1
Kondensat	29,3	37,6	46,1	56,8	58,4	58,6	60,7
Teer/Öl	20,7	24,6	30,3	39,8	38,2	38,6	41,3
Zersetzungswasser	8,7	13,1	15,7	17,0	20,2	20,0	19,4
Gas	4,4	5,4	10,0	15,6	15,8	19,6	20,2
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang D - 20: Produktzusammensetzung bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Buche rindenfrei, 2309) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**318**	**331**	**349**	**423**	**503**	**611**	**698**
Aufheizrate in K/min	45	44	55	60	85	119	140
Koks				in Ma.-% (wf)			
A	0,9	1,0	1,3	2,0	2,2	2,6	2,9
FB	73,4	66,2	54,5	30,0	22,2	14,3	10,3
Cfix	25,8	32,8	44,3	68,0	75,6	83,1	86,8
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
C	56,4	59,9	65,8	77,9	82,6	88,1	89,6
H	5,6	5,2	5,0	3,9	3,3	2,8	2,3
N	0,1	0,2	0,2	0,3	0,2	0,3	0,3
O+SC	36,9	33,7	27,7	15,9	11,7	6,3	4,9
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Pyrolysegas				in Ma.-% (wf)			
C	32,4	32,6	32,9	34,3	35,7	37,2	38,3
H	0,2	0,3	0,3	0,9	1,5	2,3	2,9
N	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
O+SC	67,4	67,1	66,8	64,8	62,8	60,5	58,7
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Kondensat, gesamt				in Ma.-% (wf)			
A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C	36,9	36,4	37,7	39,9	38,6	39,2	40,5
H	8,0	8,2	8,3	8,6	8,6	8,6	8,3
N	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
O+SC	54,8	55,1	53,7	51,3	52,6	51,9	50,9
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Teer/Öl				in Ma.-% (wf)			
A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C	52,4	55,8	57,3	56,9	59,0	59,5	59,5
H	6,6	6,6	6,8	7,4	7,2	7,3	7,0
N	0,6	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4
O+SC	40,5	37,1	35,4	35,3	33,5	32,8	33,1
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Zersetzungswasser				in Ma.-% (wf)			
H	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2
O	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang D - 21: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff enthaltenen Elemente auf die Produkte bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Buche rindenfrei, 2309) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**318**	**331**	**349**	**423**	**503**	**611**	**698**
Aufheizrate in K/min	45	44	55	60	85	119	140
C-Verteilung				in %			
Koks	75,5	69,1	58,6	44,0	43,6	39,4	35,3
Kondensat, gesamt	21,6	27,5	34,8	45,3	45,1	46,0	49,3
Zersetzungswasser	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Teer/Öl	21,6	27,5	34,8	45,3	45,1	46,0	49,3
Gas	2,9	3,5	6,6	10,7	11,3	14,6	15,5
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
H-Verteilung				in %			
Koks	61,7	49,5	36,8	18,0	14,4	10,1	7,4
Kondensat, gesamt	38,2	50,3	62,7	79,6	81,9	82,5	82,9
Zersetzungswasser	15,9	23,9	28,8	31,2	37,0	36,6	35,5
Teer/Öl	22,3	26,4	33,9	48,4	44,9	45,9	47,4
Gas	0,1	0,2	0,6	2,4	3,8	7,4	9,7
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
N-Verteilung				in %			
Koks	43,0	40,1	33,3	32,6	30,2	27,6	22,8
Kondensat, gesamt	57,0	59,9	66,7	67,4	69,8	72,4	77,2
Zersetzungswasser	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Teer/Öl	57,0	59,9	66,7	67,4	69,8	72,4	77,2
Gas	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
O(+SC)-Verteilung				in %			
Koks	56,5	44,4	28,2	10,2	7,0	3,2	2,2
Kondensat, gesamt	36,7	47,4	56,6	66,7	70,3	69,6	70,7
Zersetzungswasser	17,6	26,5	32,0	34,6	41,0	40,6	39,4
Teer/Öl	19,1	20,9	24,6	32,1	29,3	29,0	31,3
Gas	6,8	8,2	15,2	23,1	22,7	27,2	27,1
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang D - 22: Energieinhalte der Produkte und „Reaktionsenthalpie“ bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Buche rindenfrei, 2309) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**318**	**331**	**349**	**423**	**503**	**611**	**698**
Aufheizrate in K/min	45	44	55	60	85	119	140
Koks				in kJ/kg (wf)			
Brennwert	22.138	23.469	25.583	29.441	30.759	32.488	32.684
Heizwert	20.909	22.323	24.481	28.588	30.032	31.883	32.184
Pyrolysegas				in kJ/kg (wf)			
Brennwert	3.517	3.685	3.923	5.361	6.756	8.575	10.100
Heizwert	3.491	3.651	3.878	5.234	6.549	8.229	9.625
Kondensat, gesamt				in kJ/kg (wf)			
Brennwert	15.589	15.982	16.907	17.310	17.367	17.902	18.295
Heizwert	13.867	14.035	14.966	15.541	15.453	15.963	16.305
Teer/Öl				in kJ/kg (wf)			
Brennwert	21.114	23.169	24.405	23.672	25.244	25.894	25.728
Heizwert	19.694	21.484	22.724	22.191	23.608	24.216	23.951
Zersetzungswasser				in kJ/kg (wf)			
Brennwert	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442
Heizwert	0	0	0	0	0	0	0
$\Delta_R H_{Chem}$ (P-BM)				in kJ/kg (wf)			
Brennwert	113	311	159	-439	-93	16	160
Heizwert	118	249	103	-372	-103	9	91
Koks				in kJ/kg (waf)			
Brennwert	22.329	23.704	25.915	30.050	31.440	33.341	33.662
Heizwert	21.089	22.546	24.799	29.179	30.697	32.720	33.147
$\Delta_R H_{Chem}$ (P-BM)				in kJ/kg (waf)			
Brennwert	114	312	160	-442	-93	16	161
Heizwert	119	250	103	-375	-103	9	91

Tab Anhang D - 23: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff chemisch gebundenen Energie auf die Produkte bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Buche rindenfrei, 2309) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**318**	**331**	**349**	**423**	**503**	**611**	**698**
Aufheizrate in K/min	45	44	55	60	85	119	140
Koks				in % (wf)			
Brennwert	76,2	69,6	58,7	42,8	41,8	37,4	33,1
Heizwert	77,3	71,1	60,3	44,6	43,8	39,4	35,0
Pyrolysegas				in % (wf)			
Brennwert	0,8	1,0	2,0	4,3	5,5	8,7	10,5
Heizwert	0,8	1,1	2,1	4,5	5,7	8,9	10,7
Kondensat, gesamt				in % (wf)			
Brennwert	23,6	31,0	40,1	50,7	52,3	54,1	57,2
Heizwert	22,5	29,2	38,1	48,8	49,9	51,8	54,8
Teer/Öl				in % (wf)			
Brennwert	22,5	29,4	38,2	48,5	49,7	51,5	54,8
Heizwert	22,5	29,2	38,1	48,8	49,9	51,8	54,8
Zersetzungswasser				in % (wf)			
Brennwert	1,1	1,6	2,0	2,1	2,5	2,5	2,4
Heizwert	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
$\Delta_R H_{Chem}$ (P-BM)				in % (wf)			
Brennwert	0,6	1,6	0,8	-2,3	-0,5	0,1	0,8
Heizwert	0,7	1,4	0,6	-2,1	-0,6	0,1	0,5

Tab Anhang D - 24: Gaszusammensetzung, Ausbeuten der Gaskomponenten und Gasdichte bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Buche rindenfrei, 2309) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**318**	**331**	**349**	**423**	**503**	**611**	**698**
Aufheizrate in K/min	45	44	55	60	85	119	140
Gaszusammensetzung				in Vol.-%			
H2	0,54	0,60	0,67	0,93	1,05	3,58	7,40
Methan	0,49	0,85	1,34	5,17	8,39	12,46	14,18
CO	39,78	40,07	40,47	40,55	41,27	39,85	40,04
CO2	58,29	57,50	56,39	51,48	46,70	41,09	35,32
Ethin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H2S	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
COS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Propin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ethan	0,39	0,47	0,57	0,89	1,27	1,46	1,30
Ethen	0,48	0,49	0,50	0,72	0,95	1,10	1,20
Propan	0,00	0,01	0,02	0,10	0,14	0,16	0,16
Propen	0,01	0,02	0,03	0,15	0,22	0,29	0,39
i-Butan	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
N-Butan	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01
Summe	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Gasausbeute				in l i.N./kg (wf)			
H2	0,14	0,19	0,41	0,90	1,07	4,84	11,00
Methan	0,13	0,27	0,81	5,04	8,58	16,83	21,07
CO	10,43	12,88	24,37	39,49	42,18	53,81	59,48
CO2	15,28	18,48	33,95	50,14	47,73	55,49	52,48
Ethin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H2S	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
COS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Propin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ethan	0,10	0,15	0,34	0,87	1,30	1,96	1,93
Ethen	0,13	0,16	0,30	0,70	0,97	1,49	1,78
Propan	0,00	0,00	0,01	0,10	0,15	0,21	0,24
Propen	0,00	0,01	0,02	0,14	0,22	0,39	0,58
i-Butan	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
N-Butan	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01
Summe	26,22	32,15	60,20	97,39	102,22	135,03	148,58
Gasdichte in kJ/m^3 i.N.	1,67	1,66	1,65	1,59	1,54	1,45	1,35

Pyrolyse von Pappel (Kurzumtrieb, 2469) im Festbettreaktor unter Variation der Temperatur (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung)

Tab Anhang D - 25: Produktverteilung bei der Pyrolyse von Pappel (Kurzumtrieb, 2469) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**320**	**409**	**498**	**608**	**702**
Aufheizrate in K/min	56	75	99	133	145
Ausbeuten			in Ma.-% (wf)		
Koks	72,2	37,2	25,2	23,8	21,5
Kondensat	23,3	48,5	58,8	57,1	57,9
Teer/Öl	13,6	30,9	41,4	38,4	39,8
Zersetzungswasser	9,7	17,6	17,4	18,7	18,2
Gas	4,5	14,3	15,9	19,2	20,6
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Ausbeuten			in Ma.-% (waf)		
Koks	71,8	36,2	24,1	22,6	20,3
Kondensat	23,7	49,2	59,7	57,9	58,8
Teer/Öl	13,8	31,3	42,1	39,0	40,4
Zersetzungswasser	9,8	17,9	17,7	18,9	18,5
Gas	4,6	14,6	16,2	19,5	20,9
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang D - 26: Produktzusammensetzung bei der Pyrolyse von Pappel (Kurzumtrieb, 2469) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**320**	**409**	**498**	**608**	**702**
Aufheizrate in K/min	56	75	99	133	145
Koks			in Ma.-% (wf)		
A	2,1	4,1	6,0	6,4	7,1
FB	71,7	36,4	23,8	12,6	8,9
Cfix	26,2	59,5	70,2	81,0	84,0
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
C	55,8	71,1	77,1	80,8	81,3
H	5,5	4,3	3,4	2,6	2,1
N	0,5	0,9	0,8	1,0	0,8
O+SC	36,1	19,6	12,7	9,3	8,8
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Pyrolysegas			in Ma.-% (wf)		
C	30,7	32,3	33,6	36,5	37,4
H	0,1	0,5	1,0	2,3	2,8
N	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
O+SC	69,2	67,1	65,4	61,2	59,7
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Kondensat, gesamt			in Ma.-% (wf)		
A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C	34,9	38,6	42,5	41,3	42,5
H	8,2	8,7	8,3	8,5	8,4
N	0,8	0,4	0,6	0,6	0,6
O+SC	56,1	52,2	48,6	49,6	48,4
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Teer/Öl			in Ma.-% (wf)		
A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C	59,6	60,6	60,3	61,4	61,9
H	6,1	7,4	7,1	7,2	7,2
N	1,4	0,7	0,8	0,8	0,9
O+SC	32,8	31,4	31,7	30,5	30,0
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Zersetzungswasser			in Ma.-% (wf)		
H	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2
O	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang D - 27: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff enthaltenen Elemente auf die Produkte bei der Pyrolyse von Pappel (Kurzumtrieb, 2469) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**320**	**409**	**498**	**608**	**702**
Aufheizrate in K/min	56	75	99	133	145
C-Verteilung			in %		
Koks	80,9	53,1	39,1	38,6	35,1
Kondensat, gesamt	16,3	37,6	50,2	47,4	49,5
Zersetzungswasser	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Teer/Öl	16,3	37,6	50,2	47,4	49,5
Gas	2,8	9,3	10,8	14,0	15,5
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
H-Verteilung			in %		
Koks	67,6	27,0	14,4	10,3	7,6
Kondensat, gesamt	32,4	71,7	83,0	82,3	82,6
Zersetzungswasser	18,3	33,3	33,0	35,3	34,4
Teer/Öl	14,1	38,4	50,0	47,0	48,2
Gas	0,0	1,3	2,6	7,4	9,8
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
N-Verteilung			in %		
Koks	65,2	62,1	38,5	41,3	31,6
Kondensat, gesamt	34,8	37,9	61,5	58,7	68,4
Zersetzungswasser	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Teer/Öl	34,8	37,9	61,5	58,7	68,4
Gas	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
O(+SC)-Verteilung			in %		
Koks	61,7	17,3	7,6	5,2	4,5
Kondensat, gesamt	30,9	59,9	67,7	67,0	66,5
Zersetzungswasser	20,3	37,0	36,6	39,2	38,2
Teer/Öl	10,6	22,9	31,1	27,7	28,2
Gas	7,4	22,8	24,7	27,8	29,1
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang D - 28: Energieinhalte der Produkte und „Reaktionsenthalpie“ bei der Pyrolyse von Pappel (Kurzumtrieb, 2469) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**320**	**409**	**498**	**608**	**702**
Aufheizrate in K/min	56	75	99	133	145
Koks			in kJ/kg (wf)		
Brennwert	22.153	27.740	29.199	30.274	29.727
Heizwert	20.946	26.802	28.462	29.715	29.272
Pyrolysegas			in kJ/kg (wf)		
Brennwert	2.292	3.751	5.001	8.153	9.411
Heizwert	2.284	3.682	4.869	7.812	8.966
Kondensat, gesamt			in kJ/kg (wf)		
Brennwert	16.088	17.968	19.423	19.151	19.088
Heizwert	14.012	15.924	17.450	17.165	17.236
Teer/Öl			in kJ/kg (wf)		
Brennwert	25.759	26.815	26.563	27.271	26.693
Heizwert	23.942	24.998	24.788	25.507	25.110
Zersetzungswasser			in kJ/kg (wf)		
Brennwert	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442
Heizwert	0	0	0	0	0
$\Delta_R H_{Chem}$ (P-BM)			in kJ/kg (wf)		
Brennwert	339	60	87	187	-117
Heizwert	274	2	10	146	-89
Koks			in kJ/kg (waf)		
Brennwert	22.630	28.924	31.074	32.344	31.992
Heizwert	21.397	27.946	30.290	31.747	31.503
$\Delta_R H_{Chem}$ (P-BM)			in kJ/kg (waf)		
Brennwert	344	61	88	190	-119
Heizwert	278	2	10	148	-91

Tab Anhang D - 29: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff chemisch gebundenen Energie auf die Produkte bei der Pyrolyse von Pappel (Kurzumtrieb, 2469) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**320**	**409**	**498**	**608**	**702**
Aufheizrate in K/min	56	75	99	133	145
Koks			in % (wf)		
Brennwert	82,0	52,9	37,8	36,9	32,8
Heizwert	83,0	54,7	39,4	38,8	34,5
Pyrolysegas			in % (wf)		
Brennwert	0,5	2,8	4,1	8,0	9,9
Heizwert	0,6	2,9	4,3	8,2	10,1
Kondensat, gesamt			in % (wf)		
Brennwert	19,2	44,6	58,6	56,0	56,7
Heizwert	17,9	42,4	56,4	53,8	54,8
Teer/Öl			in % (wf)		
Brennwert	18,0	42,4	56,4	53,7	54,4
Heizwert	17,9	42,4	56,4	53,8	54,8
Zersetzungswasser			in % (wf)		
Brennwert	1,2	2,2	2,2	2,3	2,3
Heizwert	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
$\Delta_R H_{Chem}$ (P-BM)			in % (wf)		
Brennwert	1,7	0,3	0,4	1,0	-0,6
Heizwert	1,5	0,0	0,1	0,8	-0,5

Tab Anhang D - 30: Gaszusammensetzung, Ausbeuten der Gaskomponenten und Gasdichte bei der Pyrolyse von Pappel (Kurzumtrieb, 2469) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**320**	**409**	**498**	**608**	**702**
Aufheizrate in K/min	56	75	99	133	145
Gaszusammensetzung			in Vol.-%		
H2	0,69	1,28	1,89	4,83	7,72
Methan	0,23	2,19	5,97	11,44	13,23
CO	30,13	33,40	36,76	35,74	36,10
CO2	68,94	61,59	54,28	44,62	39,60
Ethin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H2S	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
COS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Propin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
Ethan	0,00	0,76	0,61	1,63	1,53
Ethen	0,01	0,59	0,19	1,10	1,20
Propan	0,00	0,08	0,12	0,22	0,21
Propen	0,01	0,11	0,15	0,39	0,40
i-Butan	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
N-Butan	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01
Summe	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Gasausbeute			in l i.N./kg (wf)		
H2	0,18	1,10	1,89	6,42	11,46
Methan	0,06	1,87	5,97	15,06	19,64
CO	7,82	28,63	36,78	46,69	53,61
CO2	17,89	52,79	54,31	58,37	58,80
Ethin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H2S	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
COS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Propin	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
Ethan	0,00	0,65	0,61	2,15	2,27
Ethen	0,00	0,50	0,19	1,46	1,78
Propan	0,00	0,07	0,12	0,30	0,31
Propen	0,00	0,09	0,15	0,52	0,60
i-Butan	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
N-Butan	0,00	0,01	0,00	0,02	0,02
Summe	25,95	85,71	100,05	131,00	148,51
Gasdichte in kJ/m^3 i.N.	1,74	1,67	1,59	1,46	1,38

Pyrolyse von Weizenstroh, grau (2297) im Festbettreaktor unter Variation der Temperatur (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung)

Tab Anhang D - 31: Produktverteilung bei der Pyrolyse von Weizenstroh, grau (2297) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**269**	**340**	**408**	**509**	**613**	**705**
Aufheizrate in K/min	35	48	66	86	104	136
Ausbeuten			in Ma.-% (wf)			
Koks	84,3	50,1	36,1	30,7	28,9	27,7
Kondensat	12,7	37,7	47,9	49,9	50,4	50,2
Teer/Öl	5,3	20,9	28,1	30,7	30,3	30,6
Zersetzungswasser	7,4	16,8	19,8	19,2	20,2	19,6
Gas	2,9	12,3	16,0	19,5	20,7	22,1
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Ausbeuten			in Ma.-% (waf)			
Koks	83,2	46,4	31,4	25,6	23,7	22,4
Kondensat	13,7	40,4	51,4	53,5	54,1	53,9
Teer/Öl	5,7	22,4	30,2	32,9	32,5	32,9
Zersetzungswasser	7,9	18,0	21,2	20,6	21,7	21,0
Gas	3,1	13,1	17,2	20,9	22,2	23,7
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang D - 32: Produktzusammensetzung bei der Pyrolyse von Weizenstroh, grau (2297) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**269**	**340**	**408**	**509**	**613**	**705**
Aufheizrate in K/min	35	48	66	86	104	136
Koks			in Ma.-% (wf)			
A	8,1	13,6	18,8	22,2	23,5	24,5
FB	70,9	47,0	28,0	17,3	11,8	9,4
Cfix	21,1	39,5	53,2	60,5	64,7	66,1
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
C	49,2	59,7	64,6	66,6	68,5	68,2
H	5,6	4,7	3,7	2,7	2,2	1,7
N	0,9	1,2	1,3	1,3	1,2	1,0
O+SC	36,3	20,8	11,6	7,3	4,6	4,5
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Pyrolysegas			in Ma.-% (wf)			
C	32,4	32,9	33,4	35,2	36,3	36,9
H	0,0	0,2	0,5	1,5	2,4	3,0
N	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
O+SC	67,6	66,9	66,1	63,3	61,3	60,1
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Kondensat, gesamt			in Ma.-% (wf)			
A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C	32,7	33,7	37,5	38,8	38,3	39,0
H	8,0	9,0	9,1	9,3	9,2	9,2
N	1,6	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3
O+SC	57,6	56,4	52,4	50,8	51,3	50,5
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Teer/Öl			in Ma.-% (wf)			
A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C	78,0	60,8	63,9	63,1	63,9	63,9
H	3,7	7,2	7,6	8,1	7,8	7,9
N	3,9	1,7	1,7	1,8	2,0	2,1
O+SC	14,4	30,3	26,9	27,0	26,3	26,0
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Zersetzungswasser			in Ma.-% (wf)			
H	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2
O	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang D - 33: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff enthaltenen Elemente auf die Produkte bei der Pyrolyse von Weizenstroh, grau (2297) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**269**	**340**	**408**	**509**	**613**	**705**
Aufheizrate in K/min	35	48	66	86	104	136
C-Verteilung			in %			
Koks	89,0	64,1	50,0	43,8	42,5	40,5
Kondensat, gesamt	8,9	27,2	38,5	41,5	41,4	42,0
Zersetzungswasser	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Teer/Öl	8,9	27,2	38,5	41,5	41,4	42,0
Gas	2,0	8,7	11,5	14,7	16,1	17,5
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
H-Verteilung			in %			
Koks	82,2	41,0	23,0	14,4	11,1	8,3
Kondensat, gesamt	17,8	58,6	75,5	80,4	80,4	80,1
Zersetzungswasser	14,4	32,7	38,4	37,3	39,2	38,0
Teer/Öl	3,4	25,9	37,1	43,1	41,2	42,1
Gas	0,0	0,5	1,5	5,2	8,5	11,6
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
N-Verteilung			in %			
Koks	77,8	62,0	50,0	41,0	35,8	30,2
Kondensat, gesamt	22,2	38,0	50,0	59,0	64,2	69,8
Zersetzungswasser	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Teer/Öl	22,2	38,0	50,0	59,0	64,2	69,8
Gas	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
O(+SC)-Verteilung			in %			
Koks	76,7	26,1	10,5	5,6	3,4	3,1
Kondensat, gesamt	18,4	53,3	63,0	63,5	64,9	63,6
Zersetzungswasser	16,5	37,4	44,1	42,8	44,9	43,6
Teer/Öl	1,9	15,9	18,9	20,7	20,0	20,0
Gas	5,0	20,5	26,5	30,9	31,7	33,3
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang D - 34: Energieinhalte der Produkte und „Reaktionsenthalpie“ bei der Pyrolyse von Weizenstroh, grau (2297) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**269**	**340**	**408**	**509**	**613**	**705**
Aufheizrate in K/min	35	48	66	86	104	136
Koks			in kJ/kg (wf)			
Brennwert	19.562	23.689	24.942	24.880	25.355	24.708
Heizwert	18.336	22.660	24.142	24.288	24.873	24.332
Pyrolysegas			in kJ/kg (wf)			
Brennwert	3.324	3.829	4.426	6.466	8.152	9.330
Heizwert	3.320	3.801	4.353	6.255	7.798	8.851
Kondensat, gesamt			in kJ/kg (wf)			
Brennwert	13.783	15.751	18.461	18.807	18.714	19.019
Heizwert	11.842	13.573	16.210	16.685	16.543	16.851
Teer/Öl			in kJ/kg (wf)			
Brennwert	29.473	26.478	29.731	29.061	29.570	29.619
Heizwert	28.227	24.512	27.615	27.139	27.579	27.626
Zersetzungswasser			in kJ/kg (wf)			
Brennwert	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442
Heizwert	0	0	0	0	0	0
$\Delta_R H_{Chem.}$ (P-BM)			in kJ/kg (wf)			
Brennwert	-190	-277	10	-275	-89	-88
Heizwert	-214	-358	-111	-299	-139	-129
Koks			in kJ/kg (waf)			
Brennwert	21.274	27.405	30.726	31.960	33.139	32.733
Heizwert	19.941	26.215	29.740	31.199	32.510	32.235
$\Delta_R H_{Chem.}$ (P-BM)			in kJ/kg (waf)			
Brennwert	-204	-297	11	-296	-95	-95
Heizwert	-229	-384	-119	-321	-149	-139

Tab Anhang D - 35: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff chemisch gebundenen Energie auf die Produkte bei der Pyrolyse von Weizenstroh, grau (2297) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**269**	**340**	**408**	**509**	**613**	**705**
Aufheizrate in K/min	35	48	66	86	104	136
Koks			in % (wf)			
Brennwert	89,0	64,0	48,5	41,1	39,5	36,9
Heizwert	89,5	65,6	50,4	43,1	41,6	39,0
Pyrolysegas			in % (wf)			
Brennwert	0,5	2,5	3,8	6,8	9,1	11,1
Heizwert	0,6	2,7	4,0	7,0	9,3	11,3
Kondensat, gesamt			in % (wf)			
Brennwert	9,5	32,0	47,7	50,6	50,9	51,5
Heizwert	8,7	29,6	44,9	48,1	48,3	48,9
Teer/Öl			in % (wf)			
Brennwert	8,5	29,8	45,1	48,1	48,3	48,9
Heizwert	8,7	29,6	44,9	48,1	48,3	48,9
Zersetzungswasser			in % (wf)			
Brennwert	1,0	2,2	2,6	2,5	2,7	2,6
Heizwert	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
$\Delta_R H_{Chem}$ (P-BM)			in % (wf)			
Brennwert	-1,0	-1,5	0,1	-1,5	-0,5	-0,5
Heizwert	-1,2	-2,1	-0,6	-1,7	-0,8	-0,7

Tab Anhang D - 36: Gaszusammensetzung, Ausbeuten der Gaskomponenten und Gasdichte bei der Pyrolyse von Weizenstroh, grau (2297) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**269**	**340**	**408**	**509**	**613**	**705**
Aufheizrate in K/min	35	48	66	86	104	136
Gaszusammensetzung			in Vol.-%			
H2	0,15	0,24	0,41	1,57	5,73	10,68
Methan	0,09	0,50	2,19	7,25	10,97	12,11
CO	42,75	42,65	39,78	35,64	33,20	31,13
CO2	56,90	55,56	55,66	51,73	46,13	42,08
Ethin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H2S	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01
COS	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01
Propin	0,03	0,05	0,07	0,07	0,07	0,08
Ethan	0,02	0,51	0,92	1,95	2,05	1,97
Ethen	0,02	0,44	0,79	1,12	1,15	1,13
Propan	0,01	0,02	0,08	0,28	0,28	0,30
Propen	0,00	0,03	0,09	0,35	0,39	0,47
i-Butan	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01
N-Butan	0,00	0,00	0,01	0,02	0,02	0,02
Summe	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Gasausbeute			in l i.N./kg (wf)			
H2	0,03	0,18	0,40	1,93	8,06	17,15
Methan	0,02	0,37	2,14	8,95	15,43	19,44
CO	7,51	31,70	38,82	44,01	46,70	50,00
CO2	10,00	41,25	54,31	63,86	64,88	67,57
Ethin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H2S	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02
COS	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01
Propin	0,01	0,04	0,07	0,09	0,10	0,13
Ethan	0,00	0,37	0,90	2,41	2,88	3,16
Ethen	0,00	0,33	0,77	1,38	1,62	1,82
Propan	0,00	0,01	0,08	0,35	0,39	0,49
Propen	0,00	0,02	0,09	0,43	0,55	0,75
i-Butan	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01
N-Butan	0,00	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04
Summe	17,58	74,28	97,59	123,47	140,66	160,60
Gasdichte in kJ/m^3 i.N.	1,66	1,65	1,64	1,58	1,47	1,38

Pyrolyse von Rapsstroh (2386) im Festbettreaktor unter Variation der Temperatur (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung)

Tab Anhang D - 37: Produktverteilung bei der Pyrolyse von Rapsstroh (2386) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**332**	**363**	**412**	**520**	**607**	**706**
Aufheizrate in K/min	54	54	67	100	103	141
Ausbeuten			in Ma.-% (wf)			
Koks	58,0	44,2	35,8	30,7	29,6	27,4
Kondensat	30,5	41,3	46,3	47,5	45,6	46,6
Teer/Öl	17,0	-	27,7	30,0	27,6	27,1
Zersetzungswasser	13,5	-	18,6	17,6	18,0	19,5
Gas	11,5	14,5	17,8	21,8	24,8	25,9
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Ausbeuten			in Ma.-% (waf)			
Koks	54,4	39,4	30,3	24,8	23,6	21,3
Kondensat	33,1	44,8	50,3	51,6	49,5	50,6
Teer/Öl	18,4	-	30,1	32,5	30,0	29,5
Zersetzungswasser	14,7	-	20,2	19,1	19,5	21,1
Gas	12,5	15,8	19,4	23,6	26,9	28,2
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang D - 38: Produktzusammensetzung bei der Pyrolyse von Rapsstroh (2386) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**332**	**363**	**412**	**520**	**607**	**706**
Aufheizrate in K/min	54	54	67	100	103	141
Koks			in Ma.-% (wf)			
A	13,6	17,8	22,0	25,6	26,6	28,6
FB	58,9	n.b.	31,1	24,1	18,9	14,4
Cfix	27,5	n.b.	46,9	50,3	54,5	56,9
Summe	100,0	-	100,0	100,0	100,0	100,0
C	54,3	n.b.	62,5	64,5	66,9	67,9
H	5,0	n.b.	3,5	2,7	1,9	1,4
N	1,1	n.b.	1,2	1,2	1,1	1,0
O+SC	26,0	n.b.	10,8	6,1	3,5	1,1
Summe	100,0	-	100,0	100,0	100,0	100,0
Pyrolysegas			in Ma.-% (wf)			
C	n.b.	31,3	32,2	32,6	33,9	36,3
H	n.b.	0,1	0,6	1,0	2,0	3,4
N	n.b.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
O+SC	n.b.	68,6	67,2	66,3	64,0	60,3
Summe	-	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Kondensat, gesamt			in Ma.-% (wf)			
A	-	-	0,0	0,0	0,0	0,0
C	-	-	37,9	39,5	38,3	37,9
H	-	-	8,8	9,3	9,6	9,0
N	-	-	1,3	1,5	1,6	1,7
O+SC	-	-	52,0	49,7	50,5	51,5
Summe	-	-	100,0	100,0	100,0	100,0
Teer/Öl			in Ma.-% (wf)			
A	-	-	0,0	0,0	0,0	0,0
C	-	-	63,3	62,7	63,3	65,0
H	-	-	7,3	8,1	8,5	7,4
N	-	-	2,2	2,4	2,7	2,9
O+SC	-	-	27,3	26,8	25,5	24,7
Summe	-	-	100,0	100,0	100,0	100,0
Zersetzungswasser			in Ma.-% (wf)			
H	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2
O	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang D - 39: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff enthaltenen Elemente auf die Produkte bei der Pyrolyse von Rapsstroh (2386) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**332**	**363**	**412**	**520**	**607**	**706**
Aufheizrate in K/min	54	54	67	100	103	141
C-Verteilung			in %			
Koks	69,0	-	49,0	43,3	43,3	40,8
Kondensat, gesamt	-	-	38,4	41,1	38,3	38,6
Zersetzungswasser	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Teer/Öl	-	-	38,4	41,1	38,3	38,6
Gas	-	10,0	12,6	15,5	18,4	20,6
Summe	-	-	100,0	100,0	100,0	100,0
H-Verteilung			in %			
Koks	53,6	-	23,0	15,0	10,4	7,0
Kondensat, gesamt	-	-	75,2	80,8	80,4	76,8
Zersetzungswasser	-	-	38,2	36,1	37,0	40,0
Teer/Öl	-	-	37,0	44,7	43,4	36,8
Gas	-	0,3	1,8	4,2	9,2	16,2
Summe	-	-	100,0	100,0	100,0	100,0
N-Verteilung			in %			
Koks	61,6	-	42,0	33,5	30,5	26,1
Kondensat, gesamt	38,4	-	58,0	66,5	69,5	73,9
Zersetzungswasser	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Teer/Öl	38,4	-	58,0	66,5	69,5	73,9
Gas	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Summe	100,0	-	100,0	100,0	100,0	100,0
O(+SC)-Verteilung			in %			
Koks	37,5	-	9,3	4,3	2,2	0,3
Kondensat, gesamt	-	-	60,5	59,5	57,9	60,4
Zersetzungswasser	-	-	41,6	39,3	40,2	43,5
Teer/Öl	-	-	19,0	20,2	17,7	16,9
Gas	-	25,1	30,2	36,3	39,9	39,3
Summe	-	-	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang D - 40: Energieinhalte der Produkte und „Reaktionsenthalpie“ bei der Pyrolyse von Rapsstroh (2386) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**332**	**363**	**412**	**520**	**607**	**706**
Aufheizrate in K/min	54	54	67	100	103	141
Koks			in kJ/kg (wf)			
Brennwert	21.506	-	24.048	24.222	24.316	24.057
Heizwert	20.408	-	23.286	23.640	23.899	23.754
Pyrolysegas			in kJ/kg (wf)			
Brennwert	-	2.716	3.663	4.417	6.360	9.562
Heizwert	-	2.702	3.592	4.280	6.071	9.000
Kondensat, gesamt			in kJ/kg (wf)			
Brennwert	-	-	17.948	18.902	18.356	18.466
Heizwert	-	-	15.719	16.763	16.217	16.245
Teer/Öl			in kJ/kg (wf)			
Brennwert	-	-	28.342	28.552	28.708	29.952
Heizwert	-	-	26.256	26.590	26.765	27.888
Zersetzungswasser			in kJ/kg (wf)			
Brennwert	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442
Heizwert	0	0	0	0	0	0
$\Delta_R H_{Chem}$ (P-BM)			in kJ/kg (wf)			
Brennwert	-	-	-224	-424	-662	-117
Heizwert	-	-	-355	-462	-646	-194
Koks			in kJ/kg (waf)			
Brennwert	24.877	-	30.814	32.562	33.119	33.715
Heizwert	23.607	-	29.837	31.780	32.550	33.291
$\Delta_R H_{Chem}$ (P-BM)			in kJ/kg (waf)			
Brennwert	-	-	-243	-460	-718	-127
Heizwert	-	-	-385	-501	-701	-210

Tab Anhang D - 41: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff chemisch gebundenen Energie auf die Produkte bei der Pyrolyse von Rapsstroh (2386) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**332**	**363**	**412**	**520**	**607**	**706**
Aufheizrate in K/min	54	54	67	100	103	141
Koks			in % (wf)			
Brennwert	70,1	-	48,4	41,8	40,4	37,1
Heizwert	71,2	-	50,2	43,7	42,5	39,2
Pyrolysegas			in % (wf)			
Brennwert	-	2,2	3,7	5,4	8,9	13,9
Heizwert	-	2,4	3,9	5,6	9,1	14,1
Kondensat, gesamt			in % (wf)			
Brennwert	28,0	-	46,7	50,5	47,0	48,3
Heizwert	26,1	-	43,8	48,0	44,5	45,6
Teer/Öl			in % (wf)			
Brennwert	26,2	-	44,2	48,1	44,6	45,7
Heizwert	26,1	-	43,8	48,0	44,5	45,6
Zersetzungswasser			in % (wf)			
Brennwert	1,9	-	2,6	2,4	2,5	2,7
Heizwert	0,0	-	0,0	0,0	0,0	0,0
$\Delta_R H_{Chem}$ (P-BM)			in % (wf)			
Brennwert	-	-	-1,3	-2,4	-3,7	-0,7
Heizwert	-	-	-2,1	-2,8	-3,9	-1,2

Tab Anhang D - 42: Gaszusammensetzung, Ausbeuten der Gaskomponenten und Gasdichte bei der Pyrolyse von Rapsstroh (2386) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**332**	**363**	**412**	**520**	**607**	**706**
Aufheizrate in K/min	54	54	67	100	103	141
Gaszusammensetzung			in Vol.-%			
H2	n.b.	0,13	0,24	1,57	7,30	15,06
Methan	n.b.	0,65	2,56	6,20	9,70	12,69
CO	n.b.	33,53	30,48	27,68	23,68	26,43
CO2	n.b.	65,43	64,71	62,82	56,32	42,29
Ethin	n.b.	0,00	0,00	0,00	0,60	0,00
H2S	n.b.	0,00	0,00	0,02	0,03	0,03
COS	n.b.	0,01	0,04	0,00	0,01	0,05
Propin	n.b.	0,00	0,23	0,00	0,00	0,26
Ethan	n.b.	0,14	0,93	1,01	1,36	1,82
Ethen	n.b.	0,07	0,64	0,25	0,36	0,87
Propan	n.b.	0,01	0,08	0,21	0,29	0,19
Propen	n.b.	0,02	0,08	0,23	0,33	0,27
i-Butan	n.b.	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01
N-Butan	n.b.	0,00	0,00	0,01	0,01	0,03
Summe	0,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Gasausbeute			in l i.N./kg (wf)			
H2	-	0,11	0,25	2,06	11,84	29,53
Methan	-	0,54	2,68	8,13	15,72	24,87
CO	-	28,30	31,83	36,28	38,39	51,83
CO2	-	55,22	67,58	82,35	91,31	82,92
Ethin	-	0,00	0,00	0,00	0,97	0,00
H2S	-	0,00	0,00	0,03	0,05	0,05
COS	-	0,01	0,04	0,00	0,01	0,10
Propin	-	0,00	0,25	0,00	0,00	0,52
Ethan	-	0,12	0,97	1,32	2,20	3,58
Ethen	-	0,06	0,67	0,33	0,58	1,70
Propan	-	0,01	0,08	0,27	0,48	0,38
Propen	-	0,02	0,08	0,30	0,54	0,53
i-Butan	-	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02
N-Butan	-	0,00	0,00	0,01	0,02	0,05
Summe	-	84,40	104,44	131,08	162,12	196,08
Gasdichte in kJ/m^3 i.N.	-	1,72	1,71	1,66	1,53	1,32

Pyrolyse von Landschaftspflegeheu (2480) im Festbettreaktor unter Variation der Temperatur (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung)

Tab Anhang D - 43: Produktverteilung bei der Pyrolyse von Landschaftspflegeheu (2480) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**303**	**398**	**500**	**600**	**700**
Aufheizrate in K/min	47	63	77	107	126
Ausbeuten			in Ma.-% (wf)		
Koks	61,4	40,1	32,2	31,1	29,9
Kondensat	30,0	45,0	49,9	48,3	47,6
Teer/Öl	15,5	28,2	30,8	28,1	28,5
Zersetzungswasser	14,6	16,8	19,1	20,2	19,1
Gas	8,5	14,9	17,9	20,6	22,5
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Ausbeuten			in Ma.-% (waf)		
Koks	57,6	34,1	25,5	24,3	22,9
Kondensat	33,0	49,5	54,9	53,1	52,3
Teer/Öl	17,0	31,0	33,9	30,9	31,3
Zersetzungswasser	16,0	18,5	21,0	22,2	21,0
Gas	9,4	16,4	19,6	22,6	24,7
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang D - 44: Produktzusammensetzung bei der Pyrolyse von Landschaftspflegeheu (2480) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**303**	**398**	**500**	**600**	**700**
Aufheizrate in K/min	47	63	77	107	126
Koks			in Ma.-% (wf)		
A	14,6	22,4	27,9	28,9	30,1
FB	53,8	29,5	18,8	13,1	8,8
Cfix	31,6	48,0	53,3	58,0	61,1
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
C	55,0	60,4	62,0	63,4	65,2
H	4,9	3,8	2,7	2,1	1,4
N	2,2	2,5	2,3	2,1	1,9
O+SC	23,2	10,9	5,2	3,5	1,4
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Pyrolysegas			in Ma.-% (wf)		
C	30,8	31,2	32,6	34,3	35,0
H	0,0	0,3	0,9	1,9	2,8
N	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
O+SC	69,2	68,5	66,5	63,8	62,2
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Kondensat, gesamt			in Ma.-% (wf)		
A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C	31,2	37,5	40,0	39,3	38,6
H	9,0	9,3	9,4	9,7	9,9
N	1,0	1,5	1,9	2,1	2,3
O+SC	58,9	51,7	48,7	48,9	49,2
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Teer/Öl			in Ma.-% (wf)		
A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C	60,4	59,9	64,8	67,6	64,5
H	6,9	8,2	8,3	8,7	9,0
N	1,9	2,4	3,1	3,6	3,8
O+SC	30,8	29,5	23,9	20,2	22,7
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Zersetzungswasser			in Ma.-% (wf)		
H	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2
O	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang D - 45: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff enthaltenen Elemente auf die Produkte bei der Pyrolyse von Landschaftspflegeheu (2480) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**303**	**398**	**500**	**600**	**700**
Aufheizrate in K/min	47	63	77	107	126
C-Verteilung			in %		
Koks	73,8	52,9	43,6	43,1	42,6
Kondensat, gesamt	20,5	36,9	43,7	41,5	40,2
Zersetzungswasser	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Teer/Öl	20,5	36,9	43,7	41,5	40,2
Gas	5,7	10,2	12,7	15,4	17,2
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
H-Verteilung			in %		
Koks	53,0	26,3	15,2	11,2	7,3
Kondensat, gesamt	46,9	73,0	82,0	81,9	81,9
Zersetzungswasser	28,4	32,9	37,3	39,5	37,3
Teer/Öl	18,5	40,2	44,8	42,4	44,6
Gas	0,1	0,7	2,8	6,9	10,8
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
N-Verteilung			in %		
Koks	82,4	59,6	43,5	39,2	34,8
Kondensat, gesamt	17,6	40,4	56,5	60,8	65,2
Zersetzungswasser	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Teer/Öl	17,6	40,4	56,5	60,8	65,2
Gas	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
O(+SC)-Verteilung			in %		
Koks	37,7	11,5	4,4	2,9	1,1
Kondensat, gesamt	46,7	61,5	64,2	62,4	61,9
Zersetzungswasser	34,1	39,5	44,8	47,5	44,8
Teer/Öl	12,6	22,0	19,4	15,0	17,1
Gas	15,6	27,0	31,4	34,7	37,0
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang D - 46: Energieinhalte der Produkte und „Reaktionsenthalpie“ bei der Pyrolyse von Landschaftspflegeheu (2480) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**303**	**398**	**500**	**600**	**700**
Aufheizrate in K/min	47	63	77	107	126
Koks			in kJ/kg (wf)		
Brennwert	22.214	23.711	23.433	23.554	23.651
Heizwert	21.135	22.889	22.840	23.102	23.346
Pyrolysegas			in kJ/kg (wf)		
Brennwert	2.316	2.799	4.216	6.379	7.921
Heizwert	2.311	2.766	4.101	6.109	7.497
Kondensat, gesamt			in kJ/kg (wf)		
Brennwert	15.280	19.211	19.345	18.458	18.951
Heizwert	13.141	17.135	17.264	16.325	16.869
Teer/Öl			in kJ/kg (wf)		
Brennwert	27.344	29.232	29.807	30.000	30.017
Heizwert	25.491	27.375	27.949	28.089	28.177
Zersetzungswasser			in kJ/kg (wf)		
Brennwert	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442
Heizwert	0	0	0	0	0
$\Delta_R H_{Chem}$ (P-BM)			in kJ/kg (wf)		
Brennwert	-413	-281	-885	-1.288	-974
Heizwert	-508	-339	-926	-1.305	-942
Koks			in kJ/kg (waf)		
Brennwert	26.020	30.568	32.500	33.122	33.826
Heizwert	24.756	29.509	31.678	32.487	33.389
$\Delta_R H_{Chem}$ (P-BM)			in kJ/kg (waf)		
Brennwert	-453	-309	-973	-1.416	-1.071
Heizwert	-558	-373	-1.017	-1.434	-1.035

Tab Anhang D - 47: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff chemisch gebundenen Energie auf die Produkte bei der Pyrolyse von Landschaftspflegeheu (2480) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**303**	**398**	**500**	**600**	**700**
Aufheizrate in K/min	47	63	77	107	126
Koks			in % (wf)		
Brennwert	72,4	50,4	40,0	38,9	37,5
Heizwert	73,6	52,0	41,7	40,7	39,5
Pyrolysegas			in % (wf)		
Brennwert	1,0	2,2	4,0	7,0	9,5
Heizwert	1,1	2,3	4,2	7,1	9,6
Kondensat, gesamt			in % (wf)		
Brennwert	23,5	45,9	52,8	51,7	54,9
Heizwert	23,5	46,1	53,0	51,9	55,1
Teer/Öl			in % (wf)		
Brennwert	22,5	43,7	48,8	44,7	45,4
Heizwert	22,4	43,7	48,9	44,7	45,5
Zersetzungswasser			in % (wf)		
Brennwert	1,9	2,2	2,5	2,6	2,5
Heizwert	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
$\Delta_R H_{Chem}$ (P-BM)			in % (wf)		
Brennwert	-2,19	-1,49	-4,70	-6,84	-5,17
Heizwert	-2,88	-1,92	-5,25	-7,40	-5,34

Tab Anhang D - 48: Gaszusammensetzung, Ausbeuten der Gaskomponenten und Gasdichte bei der Pyrolyse von Landschaftspflegeheu (2480) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**303**	**398**	**500**	**600**	**700**
Aufheizrate in K/min	47	63	77	107	126
Gaszusammensetzung			in Vol.-%		
H2	0,25	0,64	0,67	4,58	11,41
Methan	0,22	1,50	5,19	10,15	11,71
CO	30,69	30,31	29,05	26,82	24,78
CO2	68,74	67,07	63,24	55,65	49,16
Ethin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H2S	0,04	0,03	0,05	0,05	0,06
COS	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01
Propin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ethan	0,02	0,24	1,04	1,52	1,46
Ethen	0,00	0,03	0,27	0,43	0,49
Propan	0,01	0,08	0,24	0,36	0,38
Propen	0,01	0,07	0,23	0,41	0,51
i-Butan	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01
N-Butan	0,00	0,00	0,01	0,02	0,02
Summe	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Gasausbeute			in l i.N./kg (wf)		
H2	0,12	0,55	0,71	6,06	18,07
Methan	0,11	1,30	5,51	13,42	18,54
CO	15,00	26,23	30,88	35,49	39,23
CO2	33,59	58,04	67,22	73,62	77,85
Ethin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H2S	0,02	0,02	0,05	0,06	0,10
COS	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Propin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ethan	0,01	0,21	1,10	2,01	2,31
Ethen	0,00	0,03	0,28	0,57	0,78
Propan	0,00	0,07	0,25	0,47	0,61
Propen	0,01	0,06	0,24	0,55	0,81
i-Butan	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02
N-Butan	0,00	0,00	0,01	0,02	0,03
Summe	48,87	86,54	106,30	132,30	158,35
Gasdichte in kJ/m^3 i.N.	1,746	1,724	1,679	1,555	1,421

Pyrolyse von Triticale-Ganzpflanze (2471) im Festbettreaktor unter Variation der Temperatur (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung)

Tab Anhang D - 49: Produktverteilung bei der Pyrolyse von Triticale-Ganzpflanze (2471) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**307**	**353**	**404**	**500**	**602**	**705**
Aufheizrate in K/min	47	60	60	77	94	117
Ausbeuten			in Ma.-% (wf)			
Koks	54,7	43,1	33,6	27,8	25,5	27,1
Kondensat	36,0	45,7	51,6	54,3	53,2	50,6
Teer/Öl	18,8	25,8	30,2	33,0	32,0	27,9
Zersetzungswasser	17,3	19,9	21,4	21,4	21,1	22,7
Gas	9,3	11,2	14,8	17,9	21,3	22,3
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Ausbeuten			in Ma.-% (waf)			
Koks	52,5	40,4	30,5	24,4	22,0	23,6
Kondensat	37,7	47,8	54,0	56,9	55,7	53,0
Teer/Öl	19,6	27,0	31,6	34,5	33,5	29,2
Zersetzungswasser	18,1	20,8	22,4	22,4	22,1	23,8
Gas	9,8	11,7	15,5	18,7	22,3	23,4
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang D - 50: Produktzusammensetzung bei der Pyrolyse von Triticale-Ganzpflanze (2471) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**307**	**353**	**404**	**500**	**602**	**705**
Aufheizrate in K/min	47	60	60	77	94	117
Koks			in Ma.-% (wf)			
A	8,2	10,4	13,4	16,2	17,6	16,6
FB	57,5	45,0	27,6	18,5	12,2	7,7
Cfix	34,3	44,6	59,0	65,3	70,2	75,7
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
C	58,4	63,3	68,8	72,1	74,2	76,9
H	5,0	4,6	3,8	2,9	2,3	1,7
N	1,5	1,8	1,9	1,9	1,8	1,7
O+SC	26,9	19,8	12,2	6,9	4,1	3,1
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Pyrolysegas			in Ma.-% (wf)			
C	32,3	32,2	32,5	32,4	33,6	35,0
H	0,1	0,1	0,3	0,3	0,9	1,9
N	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
O+SC	67,6	67,7	67,2	67,3	65,5	63,1
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Kondensat, gesamt			in Ma.-% (wf)			
A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C	31,3	33,5	35,4	37,4	37,8	34,7
H	9,0	8,7	9,0	9,4	9,8	10,1
N	0,6	0,5	0,8	0,9	1,1	1,1
O+SC	59,1	57,3	54,8	52,2	51,4	54,1
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Teer/Öl			in Ma.-% (wf)			
A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C	60,1	59,3	60,4	61,7	62,7	62,9
H	7,0	6,7	7,5	8,3	8,8	9,1
N	1,2	1,0	1,3	1,6	1,8	2,1
O+SC	31,7	33,0	30,8	28,5	26,7	25,9
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Zersetzungswasser			in Ma.-% (wf)			
H	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2
O	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang D - 51: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff enthaltenen Elemente auf die Produkte bei der Pyrolyse von Triticale-Ganzpflanze (2471) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**307**	**353**	**404**	**500**	**602**	**705**
Aufheizrate in K/min	47	60	60	77	94	117
C-Verteilung			in %			
Koks	69,1	59,1	50,1	43,4	41,0	45,1
Kondensat, gesamt	24,4	33,1	39,5	44,0	43,5	38,0
Zersetzungswasser	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Teer/Öl	24,4	33,1	39,5	44,0	43,5	38,0
Gas	6,5	7,8	10,4	12,5	15,5	16,9
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
H-Verteilung			in %			
Koks	45,6	33,5	21,3	13,6	9,8	7,8
Kondensat, gesamt	54,4	66,3	78,0	85,6	86,9	85,2
Zersetzungswasser	32,4	37,2	40,0	40,0	39,6	42,5
Teer/Öl	22,0	29,1	38,0	45,6	47,3	42,7
Gas	0,1	0,1	0,7	0,8	3,3	7,0
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
N-Verteilung			in %			
Koks	78,6	75,8	61,8	50,3	44,4	43,8
Kondensat, gesamt	21,4	24,2	38,2	49,7	55,6	56,2
Zersetzungswasser	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Teer/Öl	21,4	24,2	38,2	49,7	55,6	56,2
Gas	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
O(+SC)-Verteilung			in %			
Koks	34,8	20,2	9,7	4,6	2,5	2,0
Kondensat, gesamt	50,3	61,8	66,8	67,0	64,6	64,7
Zersetzungswasser	36,3	41,7	44,8	44,8	44,4	47,6
Teer/Öl	14,1	20,1	22,0	22,2	20,2	17,1
Gas	14,9	18,0	23,5	28,4	33,0	33,3
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang D - 52: Energieinhalte der Produkte und „Reaktionsenthalpie“ bei der Pyrolyse von Triticale-Ganzpflanze (2471) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**307**	**353**	**404**	**500**	**602**	**705**
Aufheizrate in K/min	47	60	60	77	94	117
Koks			in kJ/kg (wf)			
Brennwert	23.229	27.553	26.643	27.233	27.584	28.160
Heizwert	22.143	26.533	25.818	26.594	27.084	27.788
Pyrolysegas			in kJ/kg (wf)			
Brennwert	3.338	3.257	3.629	4.927	6.815	8.236
Heizwert	3.331	3.247	3.592	4.803	6.543	7.828
Kondensat, gesamt			in kJ/kg (wf)			
Brennwert	15.150	15.867	16.990	18.421	18.140	17.335
Heizwert	13.048	13.821	14.928	16.287	16.013	15.175
Teer/Öl			in kJ/kg (wf)			
Brennwert	26.851	26.212	27.279	28.774	28.500	29.436
Heizwert	25.062	24.472	25.484	26.840	26.580	27.505
Zersetzungswasser			in kJ/kg (wf)			
Brennwert	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442
Heizwert	0	0	0	0	0	0
$\Delta_R H_{Chem}$ (P-BM)			in kJ/kg (wf)			
Brennwert	207	1.236	2	205	-118	-25
Heizwert	159	1.164	-41	150	-131	-6
Koks			in kJ/kg (waf)			
Brennwert	25.314	30.764	30.761	32.489	33.488	33.780
Heizwert	24.131	29.625	29.808	31.727	32.881	33.333
$\Delta_R H_{Chem}$ (P-BM)			in kJ/kg (waf)			
Brennwert	217	1.294	2	215	-123	-26
Heizwert	167	1.219	-43	157	-137	-7

Tab Anhang D - 53: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff chemisch gebundenen Energie auf die Produkte bei der Pyrolyse von Triticale-Ganzpflanze (2471) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**307**	**353**	**404**	**500**	**602**	**705**
Aufheizrate in K/min	47	60	60	77	94	117
Koks			in % (wf)			
Brennwert	69,5	65,1	49,1	41,5	38,6	41,7
Heizwert	71,4	67,5	51,2	43,7	40,8	44,4
Pyrolysegas			in % (wf)			
Brennwert	1,7	2,0	2,9	4,8	7,9	10,1
Heizwert	1,8	2,1	3,1	5,1	8,2	10,3
Kondensat, gesamt			in % (wf)			
Brennwert	29,3	39,0	48,1	56,8	57,9	55,1
Heizwert	29,6	39,4	48,5	57,2	58,4	55,6
Teer/Öl			in % (wf)			
Brennwert	27,6	37,0	45,1	51,9	50,0	45,0
Heizwert	27,7	37,2	45,4	52,2	50,2	45,3
Zersetzungswasser			in % (wf)			
Brennwert	2,3	2,7	2,9	2,9	2,8	3,0
Heizwert	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
$\Delta_R H_{Chem}$ (P-BM)			in % (wf)			
Brennwert	1,1	6,8	0,0	1,1	-0,6	-0,1
Heizwert	0,9	6,9	-0,2	0,9	-0,8	0,0

Tab Anhang D - 54: Gaszusammensetzung, Ausbeuten der Gaskomponenten und Gasdichte bei der Pyrolyse von Triticale-Ganzpflanze (2471) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**307**	**353**	**404**	**500**	**602**	**705**
Aufheizrate in K/min	47	60	60	77	94	117
Gaszusammensetzung			in Vol.-%			
H2	0,26	0,30	0,45	1,03	4,88	9,84
Methan	0,23	0,40	1,69	5,06	9,68	11,76
CO	42,37	40,85	39,31	36,22	32,92	30,88
CO2	57,02	58,34	58,06	55,82	50,07	44,95
Ethin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H2S	0,04	0,00	0,03	0,03	0,02	0,02
COS	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Propin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ethan	0,05	0,06	0,26	1,03	1,30	1,33
Ethen	0,00	0,00	0,05	0,38	0,37	0,41
Propan	0,01	0,02	0,07	0,20	0,31	0,33
Propen	0,01	0,02	0,07	0,21	0,40	0,44
i-Butan	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
N-Butan	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,02
Summe	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Gasausbeute			in l i.N./kg (wf)			
H2	0,14	0,20	0,40	1,13	6,87	15,61
Methan	0,13	0,27	1,51	5,58	13,63	18,66
CO	23,77	27,45	35,07	39,90	46,34	49,00
CO2	31,99	39,21	51,80	61,51	70,49	71,32
Ethin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H2S	0,02	0,00	0,03	0,03	0,03	0,04
COS	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Propin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ethan	0,03	0,04	0,23	1,13	1,82	2,11
Ethen	0,00	0,00	0,04	0,42	0,53	0,65
Propan	0,01	0,01	0,06	0,22	0,44	0,52
Propen	0,01	0,02	0,06	0,23	0,56	0,70
i-Butan	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02
N-Butan	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,03
Summe	56,11	67,20	89,22	110,18	140,78	158,67
Gasdichte in kJ/m^3 i.N.	1,661	1,669	1,659	1,621	1,513	1,408

Pyrolyse von Maissilage (2475) im Festbettreaktor unter Variation der Temperatur (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung)

Tab Anhang D - 55: Produktverteilung bei der Pyrolyse von Maissilage (2475) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	207	228	246	275	303	334	344	370	295	321	407	505	607	698
Aufheizrate in K/min	52	33	68	63	85	67	71	66	45	41	53	70	112	97
Ausbeuten	in Ma.-% (wf)													
Koks	96,5	93,7	93,1	87,8	83,6	74,1	66,8	61,5	71,4	44,4	29,6	27,4	25,9	24,3
Kondensat	2,9	5,4	5,7	9,7	13,6	20,7	27,2	31,6	24,0	44,5	56,4	55,8	54,8	56,0
Teer/Öl	-	2,1	1,9	3,7	-	9,4	13,0	-	-	24,2	33,6	33,2	32,2	32,5
Zersetzungswasser	-	3,3	3,7	6,0	-	11,3	14,2	-	-	20,2	22,8	22,5	22,7	23,5
Gas	0,6	0,9	1,2	2,5	2,8	5,2	6,0	6,9	4,6	11,2	14,0	16,9	19,2	19,7
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Ausbeuten	in Ma.-% (waf)													
Koks	96,4	93,4	92,8	87,3	82,9	73,0	65,4	59,8	70,2	41,9	26,5	24,2	22,7	21,0
Kondensat	3,0	5,6	5,9	10,1	14,2	21,6	28,4	33,0	25,0	46,4	58,9	58,2	57,2	58,4
Teer/Öl	-	2,2	2,0	3,9	-	9,8	13,6	-	-	25,3	35,0	34,7	33,6	33,9
Zersetzungswasser	-	3,4	3,9	6,2	-	11,8	14,8	-	-	21,1	23,8	23,5	23,7	24,5
Gas	0,6	0,9	1,3	2,6	2,9	5,4	6,2	7,2	4,8	11,7	14,6	17,6	20,1	20,6
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang D - 56: Produktzusammensetzung bei der Pyrolyse von Maissilage (2475) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	207	228	246	275	303	334	344	370	295	321	407	505	607	698
Aufheizrate in K/min	52	33	68	63	85	67	71	66	45	41	53	70	112	97
Koks							in Ma.-% (wf)							
A	4,3	4,4	4,5	4,7	5,0	5,6	6,2	6,8	5,8	9,4	14,1	15,2	16,0	17,1
FB	n.b.	79,0	78,4	76,9	n.b.	71,2	65,7	62,5	69,4	47,8	27,5	16,0	11,2	3,3
Cfix	-	16,5	17,1	18,4	-	23,2	28,1	30,7	24,8	42,9	58,4	68,8	72,7	79,6
Summe	4,3	100,0	100,0	100,0	5,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
C	n.b.	47,7	48,0	49,2	n.b.	52,5	54,7	56,3	53,1	63,4	70,4	73,4	74,8	76,6
H	n.b.	6,0	5,9	5,9	n.b.	5,7	5,6	5,4	5,8	4,9	3,9	2,9	2,5	1,7
N	n.b.	1,0	1,1	1,1	n.b.	1,3	1,3	1,4	1,2	1,7	2,0	2,0	1,9	1,8
O+SC	-	40,9	40,5	39,0	-	34,9	32,2	30,1	34,0	20,6	9,7	6,4	4,7	2,8
Summe	-	100,0	100,0	100,0	-	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Pyrolysegas							in Ma.-% (wf)							
C	28,6	30,1	31,0	31,0	32,5	31,8	32,2	32,1	-	32,0	32,1	33,1	34,9	36,3
H	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	0,1	0,3	0,9	1,9	2,9
N	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
O+SC	71,3	69,8	69,0	69,0	67,5	68,2	67,8	67,9	-	68,0	67,6	65,9	63,3	60,8
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	-	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Kondensat, gesamt							in Ma.-% (wf)							
A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C	-	25,4	21,9	23,7	-	27,8	29,0	29,9	-	32,8	37,2	37,0	36,8	36,7
H	-	9,6	10,2	9,4	-	9,0	8,8	8,8	-	8,8	8,7	9,3	9,3	9,2
N	-	1,7	1,3	1,3	-	0,7	0,7	0,7	-	0,7	0,9	0,9	1,0	1,1
O+SC	-	63,3	66,6	65,6	-	62,6	61,6	60,5	-	57,6	53,2	52,8	52,8	53,0
Summe	-	100,0	100,0	100,0	-	100,0	100,0	100,0	-	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Teer/Öl							in Ma.-% (wf)							
A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C	-	64,4	64,7	61,7	-	61,0	60,4	-	-	60,3	62,5	62,1	62,8	63,2
H	-	7,1	8,2	6,5	-	6,4	6,2	-	-	6,9	7,1	7,9	8,0	7,7
N	-	4,3	3,8	3,3	-	1,5	1,4	-	-	1,3	1,5	1,6	1,8	1,9
O+SC	-	24,2	23,3	28,5	-	31,2	31,9	-	-	31,5	29,0	28,4	27,4	27,1
Summe	-	100,0	100,0	100,0	-	100,0	100,0	-	-	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Zersetzungswasser							in Ma.-% (wf)							
H	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2
O	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang D - 57: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff enthaltenen Elemente auf die Produkte bei der Pyrolyse von Maissilage (2475) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	207	228	246	275	303	334	344	370	295	321	407	505	607	698
Aufheizrate in K/min	52	33	68	63	85	67	71	66	45	41	53	70	112	97
C-Verteilung							in %							
Koks	-	96,4	96,5	93,4	-	84,0	78,8	74,8	81,8	60,8	45,0	43,4	41,9	40,2
Kondensat, gesamt	-	3,0	2,7	5,0	-	12,4	17,0	20,4	-	31,5	45,3	44,5	43,6	44,3
Zersetzungswasser	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Teer/Öl	-	3,0	2,7	5,0	-	12,4	17,0	20,4	-	31,5	45,3	44,5	43,6	44,3
Gas	0,4	0,6	0,8	1,7	1,9	3,6	4,2	4,8	3,6	7,7	9,7	12,1	14,5	15,5
Summe	-	100,0	100,0	100,0	-	100,0	100,0	100,0	-	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
H-Verteilung							in %							
Koks	-	91,5	90,6	85,0	-	69,5	60,7	54,3	67,9	35,6	18,7	12,9	10,4	6,6
Kondensat, gesamt	-	8,5	9,4	15,0	-	30,5	39,2	45,6	-	64,3	80,6	84,5	83,7	84,0
Zersetzungswasser	-	6,0	6,8	11,0	-	20,7	26,0	-	22,8	37,0	41,8	41,3	41,5	43,0
Teer/Öl	-	2,5	2,6	4,0	-	9,8	13,3	-	9,0	27,2	38,8	43,2	42,2	40,9
Gas	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,2	0,7	2,6	5,9	9,5
Summe	-	100,0	100,0	100,0	-	100,0	100,0	100,0	-	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
N-Verteilung							in %							
Koks	-	91,4	93,1	88,5	-	86,8	82,8	78,6	83,3	70,3	53,9	51,8	46,5	41,9
Kondensat, gesamt	-	8,6	6,9	11,5	-	13,2	17,2	21,4	-	29,7	46,1	48,2	53,5	58,1
Zersetzungswasser	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Teer/Öl	-	8,6	6,9	11,5	-	13,2	17,2	21,4	-	29,7	46,1	48,2	53,5	58,1
Gas	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Summe	-	100,0	100,0	100,0	-	100,0	100,0	100,0	-	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
O(+SC)-Verteilung							in %							
Koks	-	90,4	89,1	80,9	-	61,0	50,8	43,7	57,4	21,6	6,8	4,2	2,9	1,6
Kondensat, gesamt	-	8,1	8,9	15,1	-	30,6	39,6	45,2	-	60,5	70,9	69,6	68,4	70,1
Zersetzungswasser	-	6,9	7,8	12,6	-	23,7	29,7	-	-	42,5	47,9	47,3	47,6	49,3
Teer/Öl	-	1,2	1,1	2,5	-	6,9	9,8	-	-	18,0	23,0	22,3	20,8	20,8
Gas	1,0	1,5	2,0	4,0	4,4	8,3	9,6	11,0	6,9	17,9	22,4	26,2	28,7	28,3
Summe	-	100,0	100,0	100,0	-	100,0	100,0	100,0	-	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang D - 58: Energieinhalte der Produkte und „Reaktionsenthalpie“ bei der Pyrolyse von Maissilage (2475) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	207	228	246	275	303	334	344	370	295	321	407	505	607	698
Aufheizrate in K/min	52	33	68	63	85	67	71	66	45	41	53	70	112	97
Koks							in kJ/kg (wf)							
Brennwert	n.b.	19.289	19.328	19.727	n.b.	21.205	22.097	22.691	21.435	25.416	27.593	27.743	28.313	28.236
Heizwert	n.b.	17.987	18.030	18.436	n.b.	19.954	20.884	21.513	20.167	24.346	26.749	27.114	27.777	27.874
Pyrolysegas							in kJ/kg (wf)							
Brennwert	928	1.899	2.417	2.416	3.411	2.961	3.188	3.136	-	3.119	3.451	4.688	6.710	8.840
Heizwert	921	1.889	2.412	2.413	3.408	2.956	3.184	3.131	-	3.108	3.411	4.561	6.442	8.384
Kondensat, gesamt							in kJ/kg (wf)							
Brennwert	-	-	11.994	12.182	-	14.093	14.422	-	13.916	15.496	17.496	17.650	17.180	17.495
Heizwert	-	-	9.615	9.916	-	11.876	12.264	-	11.803	13.486	15.408	15.559	15.156	15.389
Teer/Öl							in kJ/kg (wf)							
Brennwert	n.b.	n.b.	30.624	27.807	n.b.	28.036	27.443	n.b.	26.346	26.402	27.722	27.972	27.570	28.394
Heizwert	n.b.	n.b.	28.367	25.823	n.b.	26.089	25.593	n.b.	24.591	24.753	25.876	26.118	25.841	26.531
Zersetzungswasser							in kJ/kg (wf)							
Brennwert	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442
Heizwert	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\Delta_R H_{Chem}$ (P-BM)							in kJ/kg (wf)							
Brennwert	-	-	145	7	-	226	318	-	-	-48	-44	-330	-502	-159
Heizwert	-	-	136	-13	-	174	254	-	-	-83	-142	-357	-469	-181
Koks							in kJ/kg (waf)							
Brennwert	-	20.186	20.232	20.709	-	22.466	23.565	24.338	15.973	11.762	32.110	32.716	33.721	34.066
Heizwert	-	18.823	18.874	19.353	-	21.141	22.272	23.075	15.027	11.267	31.128	31.974	33.083	33.629
$\Delta_R H_{Chem}$ (P-BM)							in kJ/kg (waf)							
Brennwert	-	-	151	8	-	236	332	-	-	-50	-46	-345	-524	-166
Heizwert	-	-	142	-13	-	182	265	-	-	-86	-149	-372	-489	-189

Tab Anhang D - 59: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff chemisch gebundenen Energie auf die Produkte bei der Pyrolyse von Maissilage (2475) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	207	228	246	275	303	334	344	370	295	321	407	505	607	698
Aufheizrate in K/min	52	33	68	63	85	67	71	66	45	41	53	70	112	97
Koks	in % (wf)													
Brennwert	-	97,4	97,0	93,3	-	84,7	79,5	75,2	82,5	60,7	44,0	40,9	39,6	37,0
Heizwert	-	97,8	97,5	94,0	-	85,8	81,0	76,8	83,6	62,7	45,9	43,1	41,8	39,3
Pyrolysegas	in % (wf)													
Brennwert	0,0	0,1	0,2	0,3	0,5	0,8	1,0	1,2	-	1,9	2,6	4,3	6,9	9,4
Heizwert	0,0	0,1	0,2	0,3	0,5	0,9	1,1	1,3	-	2,0	2,8	4,5	7,2	9,6
Kondensat, gesamt	in % (wf)													
Brennwert	-	-	3,7	6,4	-	15,7	21,2	-	-	37,1	53,2	53,0	50,8	52,8
Heizwert	-	-	3,2	5,6	-	14,3	19,4	-	-	34,8	50,5	50,4	48,3	50,0
Teer/Öl	in % (wf)													
Brennwert	-	0,4	0,5	0,8	-	1,5	1,9	-	-	34,5	3,0	3,0	3,0	3,1
Heizwert	-	0,0	0,0	0,0	-	0,0	0,0	-	-	34,8	0,0	0,0	0,0	0,0
Zersetzungswasser	in % (wf)													
Brennwert	-	-	3,2	5,6	-	14,3	19,3	-	-	2,7	50,2	50,1	47,8	49,7
Heizwert	-	-	3,2	5,6	-	14,3	19,4	-	-	0,0	50,5	50,4	48,3	50,0
$\Delta_R H_{chem}$ (P-BM)	in % (wf)													
Brennwert	-	-	0,8	0,0	-	1,2	1,7	-	-	-0,3	-0,2	-1,8	-2,7	-0,9
Heizwert	-	-	0,8	-0,1	-	1,0	1,5	-	-	-0,5	-0,8	-2,1	-2,7	-1,1

Tab Anhang D - 60: Gaszusammensetzung, Ausbeuten der Gaskomponenten und Gasdichte bei der Pyrolyse von Maissilage (2475) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	207	228	246	275	303	334	344	370	295	321	407	505	607	698
Aufheizrate in K/min	52	33	68	63	85	67	71	66	45	41	53	70	112	97
Gaszusammensetzung							in Vol.-%							
H2	0,25	0,17	0,10	0,10	0,22	0,13	0,19	0,18	0,10	-	1,01	2,26	4,46	9,89
Methan	0,00	0,00	0,00	0,07	0,07	0,11	0,10	0,20	0,07	-	1,58	4,58	9,58	12,90
CO	11,77	24,30	32,08	32,52	43,90	38,61	41,16	40,38	32,52	-	36,93	32,84	31,57	28,78
CO2	87,64	75,06	67,61	67,23	55,75	61,05	58,45	59,16	67,23	-	59,97	58,33	51,64	45,04
Ethin	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	-	0,00	0,00	0,00	0,00
H2S	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	0,03	0,07	0,02	0,05
COS	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	-	0,01	0,01	0,00	0,00
Propin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	-	0,00	0,00	0,00	0,01
Ethan	0,31	0,47	0,21	0,06	0,03	0,09	0,07	0,05	0,06	-	0,28	0,64	1,47	1,41
Ethen	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	0,04	0,65	0,46	0,79
Propan	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	-	0,07	0,31	0,35	0,45
Propen	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	-	0,07	0,27	0,41	0,59
i-Butan	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	0,00	0,02	0,01	0,03
N-Butan	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	0,00	0,03	0,02	0,05
Summe	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	-	100,00	100,00	100,00	100,00
Gasausbeute							in l i.N./kg (wf)							
H2	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04	0,04	0,07	0,07	0,01	-	0,85	2,34	5,64	14,21
Methan	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,03	0,03	0,08	0,01	-	1,33	4,74	12,04	18,13
CO	0,37	1,22	2,29	4,62	7,37	11,82	14,73	16,57	4,62	-	31,02	33,97	39,64	40,22
CO2	2,74	3,78	4,83	9,56	9,36	18,69	20,91	24,27	9,56	-	50,39	60,33	64,85	63,27
Ethin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	0,00	0,00	0,00	0,00
H2S	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	0,03	0,07	0,03	0,08
COS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	0,01	0,01	0,01	0,01
Propin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	0,00	0,00	0,00	0,02
Ethan	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,03	0,03	0,02	0,01	-	0,24	0,66	1,84	1,94
Ethen	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	0,03	0,67	0,58	1,19
Propan	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	0,06	0,32	0,44	0,64
Propen	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	0,06	0,28	0,52	0,86
i-Butan	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	0,00	0,02	0,01	0,04
N-Butan	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	0,00	0,03	0,02	0,08
Summe	3,12	5,03	7,15	14,22	16,79	30,62	35,77	41,03	14,22	-	84,02	103,44	125,62	140,69
Gasdichte in kJ/m³ i.N.	1,88	1,79	1,74	1,74	1,65	1,69	1,67	1,68	1,74	-	1,67	1,63	1,53	1,40

Pyrolyse von Roggen-Ganzpflanzensilage (2473) im Festbettreaktor unter Variation der Temperatur (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung)

Tab Anhang D - 61: Produktverteilung bei der Pyrolyse von Roggen-Ganzpflanzensilage (2473) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**303**	**404**	**501**	**601**	**700**
Aufheizrate in K/min	43	53	73	90	110
Ausbeuten			in Ma.-% (wf)		
Koks	49,4	36,1	30,4	27,7	28,1
Kondensat	40,3	48,6	51,5	51,9	50,1
Teer/Öl	24,0	31,1	35,5	34,5	33,3
Zersetzungswasser	16,3	17,5	16,1	17,4	16,7
Gas	10,4	15,3	18,1	20,4	21,8
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Ausbeuten			in Ma.-% (waf)		
Koks	45,0	30,6	24,3	21,4	21,9
Kondensat	43,8	52,8	56,0	56,4	54,4
Teer/Öl	26,1	33,8	38,5	37,5	36,2
Zersetzungswasser	17,7	19,1	17,5	18,9	18,2
Gas	11,3	16,6	19,7	22,2	23,7
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang D - 62: Produktzusammensetzung bei der Pyrolyse von Roggen-Ganzpflanzensilage (2473) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**303**	**404**	**501**	**601**	**700**
Aufheizrate in K/min	43	53	73	90	110
Koks			in Ma.-% (wf)		
A	16,2	22,1	26,3	28,9	28,4
FB	47,0	27,5	17,0	13,1	9,6
Cfix	36,8	50,4	56,7	58,0	62,0
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
C	59,00	61,83	61,67	63,17	62,43
H	4,86	3,62	2,43	1,65	1,11
N	3,19	3,26	3,10	2,97	2,52
O+SC	16,73	9,15	6,46	3,28	5,51
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Pyrolysegas			in Ma.-% (wf)		
C	31,0	31,3	32,9	34,2	34,8
H	0,1	0,3	1,2	2,3	3,1
N	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
O+SC	68,9	68,3	65,9	63,5	62,1
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Kondensat, gesamt			in Ma.-% (wf)		
A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C	36,8	41,2	43,6	43,7	43,9
H	9,2	9,8	10,0	10,0	10,3
N	1,8	2,3	2,6	2,8	3,1
O+SC	52,3	46,8	43,8	43,5	42,7
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Teer/Öl			in Ma.-% (wf)		
A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C	61,7	64,4	63,3	65,8	66,0
H	7,8	9,0	9,5	9,4	9,8
N	2,9	3,6	3,8	4,2	4,7
O+SC	27,5	23,0	23,4	20,6	19,5
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Zersetzungswasser			in Ma.-% (wf)		
H	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2
O	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang D - 63: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff enthaltenen Elemente auf die Produkte bei der Pyrolyse von Roggen-Ganzpflanzensilage (2473) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**303**	**404**	**501**	**601**	**700**
Aufheizrate in K/min	43	53	73	90	110
C-Verteilung			in %		
Koks	61,8	47,4	39,7	37,1	37,3
Kondensat, gesamt	31,4	42,5	47,6	48,1	46,6
Zersetzungswasser	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Teer/Öl	31,4	42,5	47,6	48,1	46,6
Gas	6,8	10,1	12,6	14,8	16,1
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
H-Verteilung			in %		
Koks	39,3	21,4	12,1	7,5	5,1
Kondensat, gesamt	60,6	77,8	84,5	84,8	84,0
Zersetzungswasser	29,8	32,1	29,4	31,9	30,7
Teer/Öl	30,8	45,6	55,0	52,9	53,3
Gas	0,1	0,8	3,4	7,7	10,9
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
N-Verteilung			in %		
Koks	69,1	51,6	41,2	36,0	31,1
Kondensat, gesamt	30,9	48,4	58,8	64,0	68,9
Zersetzungswasser	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Teer/Öl	30,9	48,4	58,8	64,0	68,9
Gas	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
O(+SC)-Verteilung			in %		
Koks	22,6	9,0	5,4	2,4	4,2
Kondensat, gesamt	57,7	62,3	61,8	61,9	58,5
Zersetzungswasser	39,8	42,9	39,3	42,7	41,0
Teer/Öl	17,9	19,3	22,5	19,2	17,5
Gas	19,7	28,7	32,9	35,7	37,3
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang D - 64: Energieinhalte der Produkte und „Reaktionsenthalpie“ bei der Pyrolyse von Roggen-Ganzpflanzensilage (2473) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**303**	**404**	**501**	**601**	**700**
Aufheizrate in K/min	43	53	73	90	110
Koks			in kJ/kg (wf)		
Brennwert	24.269	24.201	23.197	23.159	22.351
Heizwert	23.209	23.410	22.667	22.798	22.110
Pyrolysegas			in kJ/kg (wf)		
Brennwert	2.490	2.924	4.729	6.834	8.257
Heizwert	2.483	2.883	4.576	6.500	7.773
Kondensat, gesamt			in kJ/kg (wf)		
Brennwert	18.116	20.025	21.427	21.267	19.866
Heizwert	15.936	17.796	19.307	19.060	17.713
Teer/Öl			in kJ/kg (wf)		
Brennwert	28.737	29.951	30.030	30.787	28.627
Heizwert	26.734	27.842	28.056	28.699	26.620
Zersetzungswasser			in kJ/kg (wf)		
Brennwert	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442
Heizwert	0	0	0	0	0
$\Delta_R H_{Chem}$ (P-BM)			in kJ/kg (wf)		
Brennwert	196	-409	-392	-493	-1.301
Heizwert	61	-518	-408	-540	-1.285
Koks			in kJ/kg (waf)		
Brennwert	28.964	31.082	31.492	32.583	31.231
Heizwert	27.698	30.066	30.772	32.075	30.895
$\Delta_R H_{Chem}$ (P-BM)			in kJ/kg (waf)		
Brennwert	213	-444	-427	-536	-1.414
Heizwert	66	-563	-443	-587	-1.397

Tab Anhang D - 65: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff chemisch gebundenen Energie auf die Produkte bei der Pyrolyse von Roggen-Ganzpflanzensilage (2473) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**303**	**404**	**501**	**601**	**700**
Aufheizrate in K/min	43	53	73	90	110
Koks			in % (wf)		
Brennwert	62,0	45,2	36,4	33,1	32,5
Heizwert	63,4	46,8	38,1	34,9	34,4
Pyrolysegas			in % (wf)		
Brennwert	1,3	2,3	4,4	7,2	9,3
Heizwert	1,4	2,4	4,6	7,4	9,4
Kondensat, gesamt			in % (wf)		
Brennwert	37,0	50,4	59,5	62,1	58,6
Heizwert	36,9	50,3	59,6	62,1	58,5
Teer/Öl			in % (wf)		
Brennwert	35,7	48,1	55,1	54,9	49,3
Heizwert	35,5	47,9	55,1	54,8	49,1
Zersetzungswasser			in % (wf)		
Brennwert	2,1	2,2	2,0	2,2	2,1
Heizwert	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
$\Delta_R H_{Chem}$ (P-BM)			in % (wf)		
Brennwert	1,0	-2,1	-2,0	-2,5	-6,7
Heizwert	0,3	-2,9	-2,3	-3,0	-7,1

Tab Anhang D - 66: Gaszusammensetzung, Ausbeuten der Gaskomponenten und Gasdichte bei der Pyrolyse von Roggen-Ganzpflanzensilage (2473) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**303**	**404**	**501**	**601**	**700**
Aufheizrate in K/min	43	53	73	90	110
Gaszusammensetzung			in Vol.-%		
H2	0,14	0,27	1,93	8,45	15,31
Methan	0,28	1,70	5,95	9,88	10,60
CO	32,40	29,78	27,64	22,92	22,63
CO2	66,99	67,38	61,96	55,24	48,11
Ethin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H2S	0,07	0,07	0,08	0,08	0,06
COS	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01
Propin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
Ethan	0,06	0,50	1,54	2,04	1,84
Ethen	0,00	0,08	0,31	0,45	0,47
Propan	0,02	0,11	0,32	0,50	0,47
Propen	0,02	0,09	0,23	0,41	0,45
i-Butan	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02
N-Butan	0,00	0,00	0,01	0,02	0,03
Summe	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Gasausbeute			in l i.N./kg (wf)		
H2	0,09	0,23	2,11	11,43	24,27
Methan	0,17	1,50	6,52	13,36	16,80
CO	19,40	26,26	30,28	31,00	35,89
CO2	40,12	59,41	67,88	74,72	76,28
Ethin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H2S	0,04	0,06	0,09	0,10	0,10
COS	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Propin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
Ethan	0,04	0,44	1,69	2,76	2,91
Ethen	0,00	0,07	0,34	0,61	0,74
Propan	0,01	0,10	0,35	0,67	0,75
Propen	0,01	0,08	0,25	0,56	0,72
i-Butan	0,00	0,01	0,01	0,02	0,03
N-Butan	0,00	0,00	0,01	0,03	0,04
Summe	59,88	88,17	109,56	135,28	158,57
Gasdichte in kJ/m^3 i.N.	1,735	1,730	1,653	1,511	1,375

Pyrolyse von Grünschnittroggensilage (2474) im Festbettreaktor unter Variation der Temperatur (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung)

Tab Anhang D - 67: Produktverteilung bei der Pyrolyse von Grünschnittroggensilage (2474) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**331**	**302**	**400**	**502**	**601**	**703**
Aufheizrate in K/min	37	47	65	96	110	132
Ausbeuten			in Ma.-% (wf)			
Koks	60,0	71,2	41,0	34,2	30,0	29,6
Kondensat	32,6	23,4	47,2	50,7	51,3	50,3
Teer/Öl	17,9	12,7	29,7	32,4	31,9	33,6
Zersetzungswasser	14,7	10,7	17,5	18,3	19,3	16,7
Gas	7,5	5,4	11,8	15,0	18,8	20,0
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Ausbeuten			in Ma.-% (waf)			
Koks	56,0	68,4	35,2	27,8	23,1	22,7
Kondensat	35,8	25,7	51,8	55,7	56,3	55,3
Teer/Öl	19,6	13,9	32,6	35,6	35,1	36,9
Zersetzungswasser	16,1	11,8	19,2	20,1	21,2	18,3
Gas	8,2	5,9	13,0	16,5	20,6	22,0
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang D - 68: Produktzusammensetzung bei der Pyrolyse von Grünschnittroggensilage (2474) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**331**	**302**	**400**	**502**	**601**	**703**
Aufheizrate in K/min	37	47	65	96	110	132
Koks			in Ma.-% (wf)			
A	14,9	12,5	21,8	26,1	29,8	30,1
FB	56,6	60,8	32,5	21,2	12,5	9,5
Cfix	28,5	26,6	45,7	52,8	57,7	60,4
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
C	53,7	50,9	58,8	59,8	61,8	60,4
H	5,0	5,2	3,9	3,0	2,2	1,6
N	2,0	1,9	2,4	2,4	2,3	2,1
O+SC	24,4	29,5	13,1	8,7	4,0	5,8
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Pyrolysegas			in Ma.-% (wf)			
C	30,5	31,9	32,4	33,2	34,3	34,9
H	0,1	0,1	0,2	0,8	2,0	2,5
N	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
O+SC	69,4	68,0	67,4	66,0	63,7	62,6
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Kondensat, gesamt			in Ma.-% (wf)			
A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C	33,0	31,2	36,7	39,0	39,6	40,5
H	8,7	9,3	9,0	9,3	9,4	9,7
N	1,0	0,9	1,1	1,4	1,7	1,8
O+SC	57,2	58,7	53,2	50,3	49,3	48,0
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Teer/Öl			in Ma.-% (wf)			
A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C	60,2	57,5	58,3	61,1	63,6	60,5
H	6,7	7,7	7,7	8,2	8,4	8,9
N	1,9	1,7	1,8	2,2	2,7	2,7
O+SC	31,2	33,1	32,3	28,5	25,4	27,8
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Zersetzungswasser			in Ma.-% (wf)			
H	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2
O	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang D - 69: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff enthaltenen Elemente auf die Produkte bei der Pyrolyse von Grünschnittroggensilage (2474) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**331**	**302**	**400**	**502**	**601**	**703**
Aufheizrate in K/min	37	47	65	96	110	132
C-Verteilung			in %			
Koks	71,2	80,1	53,3	45,3	40,9	39,5
Kondensat, gesamt	23,8	16,1	38,2	43,7	44,8	45,0
Zersetzungswasser	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Teer/Öl	23,8	16,1	38,2	43,7	44,8	45,0
Gas	5,0	3,8	8,5	11,0	14,2	15,5
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
H-Verteilung			in %			
Koks	51,4	62,8	27,3	17,7	11,1	8,3
Kondensat, gesamt	48,5	37,2	72,3	80,4	82,6	83,2
Zersetzungswasser	28,1	20,5	33,4	35,0	36,9	31,9
Teer/Öl	20,4	16,7	38,9	45,4	45,6	51,3
Gas	0,1	0,1	0,4	2,0	6,3	8,5
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
N-Verteilung			in %			
Koks	78,2	86,3	65,5	53,1	44,2	40,0
Kondensat, gesamt	21,8	13,7	34,5	46,9	55,8	60,0
Zersetzungswasser	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Teer/Öl	21,8	13,7	34,5	46,9	55,8	60,0
Gas	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
O(+SC)-Verteilung			in %			
Koks	38,0	54,7	14,0	7,8	3,1	4,4
Kondensat, gesamt	48,5	35,7	65,4	66,4	65,8	62,9
Zersetzungswasser	34,0	24,8	40,4	42,3	44,7	38,6
Teer/Öl	14,5	10,9	25,0	24,0	21,1	24,3
Gas	13,5	9,6	20,7	25,8	31,1	32,7
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang D - 70: Energieinhalte der Produkte und „Reaktionsenthalpie“ bei der Pyrolyse von Grünschnittroggensilage (2474) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**331**	**302**	**400**	**502**	**601**	**703**
Aufheizrate in K/min	37	47	65	96	110	132
Koks			in kJ/kg (wf)			
Brennwert	21.831	20.629	23.635	23.065	23.123	22.289
Heizwert	20.736	19.502	22.785	22.405	22.649	21.931
Pyrolysegas			in kJ/kg (wf)			
Brennwert	2.214	3.077	3.495	4.534	6.466	7.457
Heizwert	2.200	3.069	3.471	4.431	6.191	7.087
Kondensat, gesamt			in kJ/kg (wf)			
Brennwert	15.169	14.522	16.601	17.997	18.483	18.421
Heizwert	13.076	12.386	14.724	16.048	16.452	16.572
Teer/Öl			in kJ/kg (wf)			
Brennwert	25.643	24.744	24.931	26.793	28.193	26.345
Heizwert	23.838	22.867	23.386	25.123	26.410	24.789
Zersetzungswasser			in kJ/kg (wf)			
Brennwert	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442
Heizwert	0	0	0	0	0	0
$\Delta_R H_{Chem}$ (P-BM)			in kJ/kg (wf)			
Brennwert	-139	-85	-395	-627	-715	-965
Heizwert	-201	-111	-355	-580	-672	-799
Koks			in kJ/kg (waf)			
Brennwert	25.646	23.585	30.205	31.190	32.918	31.891
Heizwert	24.361	22.296	29.119	30.299	32.244	31.379
$\Delta_R H_{Chem}$ (P-BM)			in kJ/kg (waf)			
Brennwert	-153	-94	-433	-688	-785	-1.060
Heizwert	-221	-122	-389	-636	-738	-877

Tab Anhang D - 71: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff chemisch gebundenen Energie auf die Produkte bei der Pyrolyse von Grünschnittroggensilage (2474) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**331**	**302**	**400**	**502**	**601**	**703**
Aufheizrate in K/min	37	47	65	96	110	132
Koks			in % (wf)			
Brennwert	71,39	80,08	52,87	43,08	37,81	36,02
Heizwert	72,89	81,37	54,79	44,98	39,81	38,10
Pyrolysegas			in % (wf)			
Brennwert	0,90	0,91	2,25	3,72	6,62	8,15
Heizwert	0,96	0,97	2,40	3,91	6,81	8,33
Kondensat, gesamt			in % (wf)			
Brennwert	26,9	18,5	42,7	49,8	51,7	50,6
Heizwert	25,0	17,0	40,7	47,7	49,4	48,9
Teer/Öl			in % (wf)			
Brennwert	24,99	17,11	40,40	47,34	49,10	48,34
Heizwert	24,97	17,00	40,73	47,71	49,44	48,89
Zersetzungswasser			in % (wf)			
Brennwert	1,96	1,43	2,33	2,44	2,57	2,22
Heizwert	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\Delta_R H_{Chem}$ (P-BM)			in % (wf)			
Brennwert	-0,8	-0,5	-2,2	-3,4	-3,9	-5,3
Heizwert	-1,2	-0,7	-2,1	-3,4	-3,9	-4,7

Tab Anhang D - 72: Gaszusammensetzung, Ausbeuten der Gaskomponenten und Gasdichte bei der Pyrolyse von Grünschnittroggensilage (2474) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**331**	**302**	**400**	**502**	**601**	**703**
Aufheizrate in K/min	37	47	65	96	110	132
Gaszusammensetzung			in Vol.-%			
H2	0,59	0,55	0,35	0,75	4,55	8,98
Methan	0,36	0,18	1,08	4,33	9,72	10,98
CO	27,39	39,29	40,60	35,88	25,87	25,37
CO2	71,39	59,89	57,68	57,56	56,40	51,46
Ethin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H2S	0,00	0,00	0,00	0,04	0,10	0,00
COS	0,02	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00
Propin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
Ethan	0,09	0,08	0,17	0,82	1,80	1,71
Ethen	0,00	0,00	0,01	0,20	0,49	0,52
Propan	0,07	0,01	0,05	0,22	0,47	0,43
Propen	0,08	0,01	0,04	0,19	0,53	0,50
i-Butan	0,01	0,00	0,00	0,01	0,02	0,02
N-Butan	0,01	0,00	0,00	0,01	0,03	0,03
Summe	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Gasausbeute			in l i.N./kg (wf)			
H2	0,25	0,18	0,25	0,69	5,45	12,24
Methan	0,15	0,06	0,77	3,98	11,65	14,97
CO	11,62	12,68	28,85	32,94	31,00	34,59
CO2	30,28	19,33	40,98	52,73	67,59	70,15
Ethin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H2S	0,00	0,00	0,00	0,03	0,13	0,00
COS	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01
Propin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
Ethan	0,04	0,03	0,12	0,75	2,15	2,33
Ethen	0,00	0,00	0,01	0,18	0,59	0,71
Propan	0,03	0,00	0,04	0,20	0,57	0,59
Propen	0,03	0,00	0,03	0,18	0,63	0,68
i-Butan	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03	0,02
N-Butan	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03	0,03
Summe	42,41	32,28	71,06	91,70	119,83	136,32
Gasdichte in kJ/m^3 i.N.	1,50	1,71	1,66	1,43	1,74	1,67

Anhang E Ergebnisse zum Einfluss des Systemdrucks auf die Biomassepyrolyse

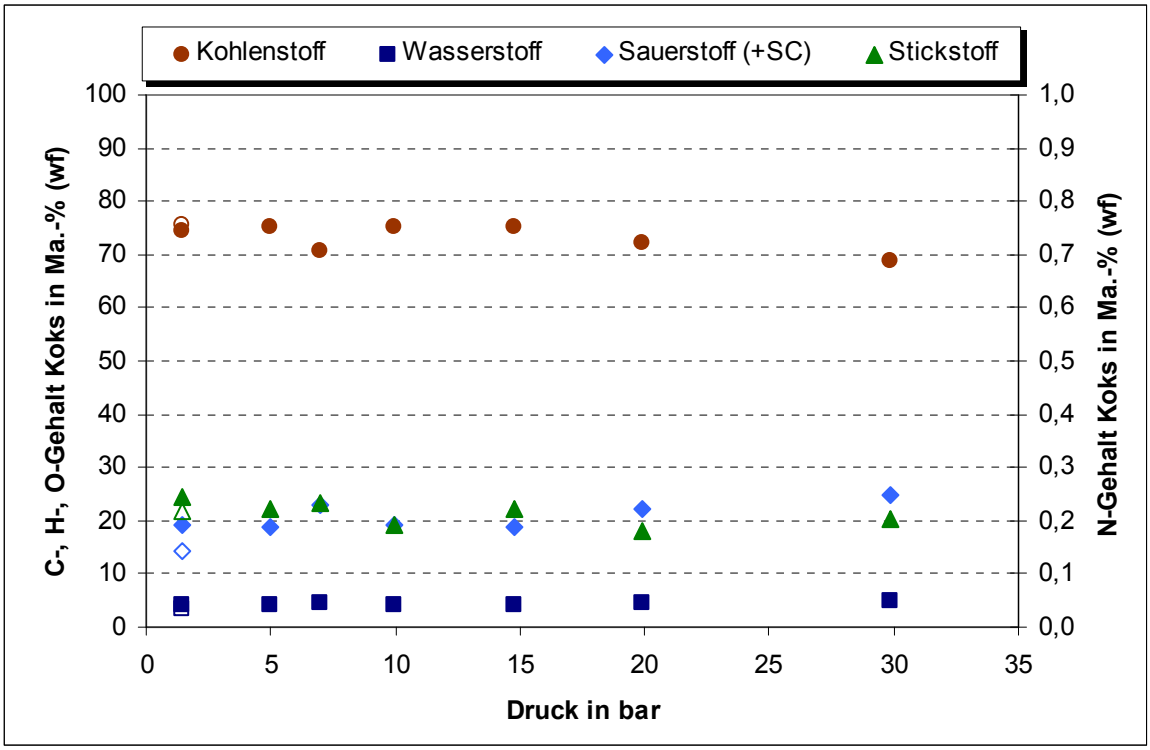


Abb Anhang E - 1: Einfluss des Systemdrucks auf die Elementarzusammensetzung des Kokses bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2478) in der Druckpyrolyseanlage (Fallrohrbetrieb) bei 800 °C (Körnung: 0,2…0,5 mm) *(Legende: ausgefüllte Symbole: Koks aus Reaktionsrohr, umrandete Symbole: Koks aus Koksauffangbehälter)*

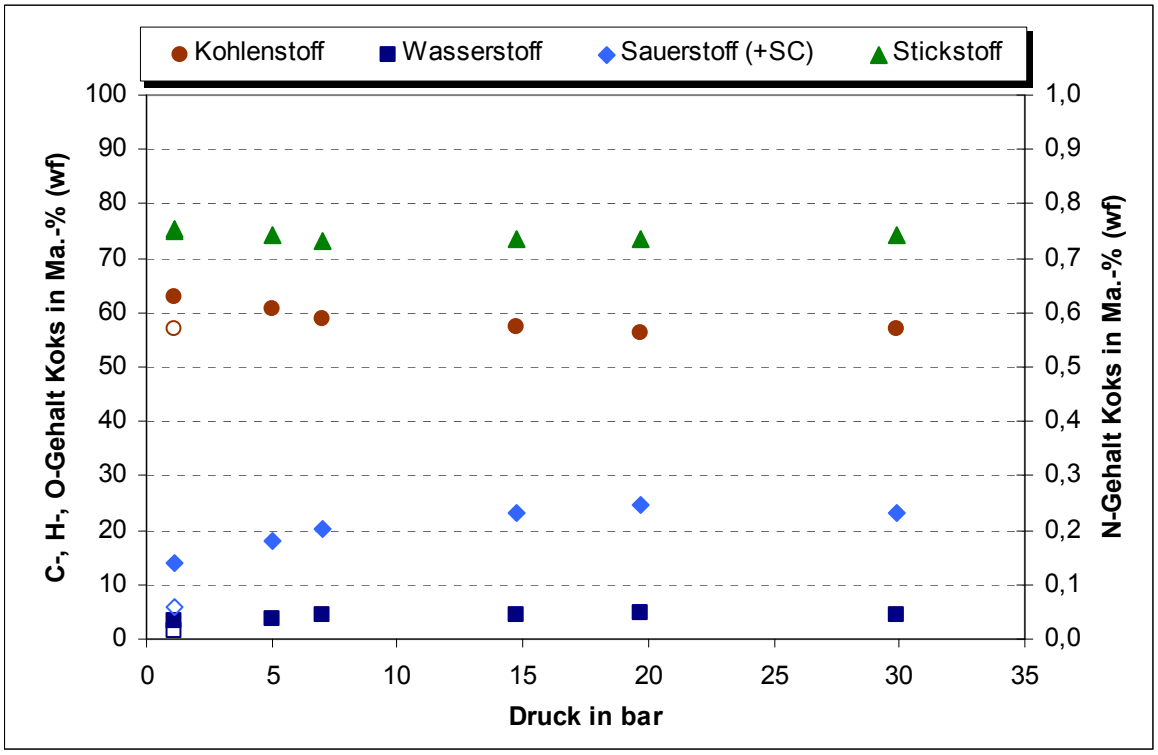


Abb Anhang E - 2: Einfluss des Systemdrucks auf die Elementarzusammensetzung des Kokses bei der Pyrolyse von Weizenstroh (2296) Kokses in der Druckpyrolyseanlage (Fallrohrbetrieb) bei 800 °C (Körnung: 0,2…0,5 mm) *(Legende: ausgefüllte Symbole: Koks aus Reaktionsrohr, umrandete Symbole: Koks aus Koksauffangbehälter)*

Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2478) bei 800 °C im Fallrohrreaktor unter Variation des Systemdrucks (Körnung: 0,2…0,5 mm)

Tab Anhang E - 1: Produktverteilung bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2478) in der Druckpyrolyseanlage (Fallrohrbetrieb) bei 800 °C und verschiedenen Drücken (Körnung: 0,2…0,5 mm)

Temperatur in °C	800	800	800	800	800	800	800
Temperatur (Anhaftung im RR) in °C	754	795	782	795	761	600	667
Druck (Mittelwert) in bar	**1,4**	**5,0**	**7,0**	**9,9**	**14,8**	**19,9**	**29,8**
Ausbeuten				in Ma.-% (wf)			
Pyrolysegas	76,7	64,4	66,9	50,4	49,8	50,9	34,1
Kondensat	13,7	13,9	9,5	19,8	18,3	18,1	16,3
Koks (RR)	3,9	20,3	23,1	29,0	31,5	30,6	38,6
Koks (KAB)	5,7	1,3	0,6	0,9	0,4	0,5	11,0
Koks, gesamt	9,6	21,7	23,6	29,9	31,9	31,1	49,6
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang E - 2: Zusammensetzung von Koks und Gas bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2478) in der Druckpyrolyseanlage (Fallrohrbetrieb) bei 800 °C und verschiedenen Drücken (Körnung: 0,2…0,5 mm)

Temperatur in °C	800	800	800	800	800	800	800
Temperatur (Anhaftung im RR) in °C	700	675	450	470	667	460	560
Druck (Mittelwert) in bar	**1,1**	**5,0**	**7,0**	**10,0**	**14,7**	**19,7**	**29,9**
Koks (KAB)				in Ma.-% (wf)			
A	2,0	1,6	1,4	1,5	1,5	1,1	1,1
FB	40,7	37,7	45,4	38,5	38,5	45,2	52,5
Cfix	57,3	60,7	53,2	60,0	60,0	53,8	46,4
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
C	74,4	75,2	70,8	75,0	75,3	72,2	69,0
H	4,1	4,2	4,5	4,2	4,2	4,6	4,8
N	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
O+SC	19,3	18,9	23,1	19,1	18,7	22,0	24,9
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Koks (KAB)				in Ma.-% (wf)			
A	6,5	-	-	-	-	-	-
FB	28,4	-	-	-	-	-	-
Cfix	65,1	-	-	-	-	-	-
Summe	100,0	-	-	-	-	-	-
C	75,7	-	-	-	-	-	-
H	3,4	-	-	-	-	-	-
N	0,2	-	-	-	-	-	-
O+SC	14,2	-	-	-	-	-	-
Summe	100,0	-	-	-	-	-	-
Pyrolysegas				in Ma.-% (wf)			
C	45,6	43,1	43,4	42,1	40,5	39,4	40,0
H	5,4	5,4	6,1	5,7	5,8	5,4	6,3
N	0,0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0
O+SC	49,0	50,5	48,5	49,2	49,7	50,2	47,8
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang E - 3: Gaszusammensetzung und -ausbeuten bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2478) in der Druckpyrolyseanlage (Fallrohrbetrieb) bei 800 °C und verschiedenen Drücken (Körnung: 0,2…0,5 mm)

Temperatur in °C	800	800	800	800	800	800	800
Temperatur (Anhaftung im RR) in °C	700	675	450	470	667	460	560
Druck (Mittelwert) in bar	**1,1**	**5,0**	**7,0**	**10,0**	**14,7**	**19,7**	**29,9**
Gaszusammensetzung				in Vol.-%			
H2	17,01	15,75	16,93	16,67	18,77	19,04	20,48
Methan	16,20	20,62	24,82	24,62	25,62	25,89	29,07
CO	53,60	45,05	41,52	38,10	32,33	32,46	28,71
CO2	7,31	14,79	14,97	19,02	22,56	22,26	21,61
Ethin	4,60	2,94	1,28	1,12	0,42	0,14	0,05
H2S	0,77	0,75	0,44	0,43	0,30	0,20	0,09
COS	0,21	0,04	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Propin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ethan	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ethen	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Propan	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Propen	0,25	0,06	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00
i-Butan	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
N-Butan	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Summe	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Gasausbeute				in l i.N./kg (wf)			
H2	136,51	102,55	121,76	80,04	92,07	86,70	66,30
Methan	116,23	117,88	152,88	109,92	109,44	107,35	84,44
CO	373,30	242,24	256,93	171,71	142,27	131,26	80,57
CO2	75,79	110,60	107,11	97,48	115,64	130,00	87,42
Ethin	1,64	0,40	0,15	0,03	0,01	0,01	0,00
H2S	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
COS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Propin	0,28	0,02	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00
Ethan	5,27	3,85	2,68	1,94	1,39	1,02	0,27
Ethen	33,30	17,82	8,52	5,68	2,39	1,04	0,23
Propan	0,09	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00
Propen	1,62	0,39	0,19	0,11	0,04	0,00	0,00
i-Butan	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00
N-Butan	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01
Summe	744,04	595,78	650,31	466,92	463,28	457,37	319,24
Gasdichte in kJ/m^3 i.N.	1,03	1,08	1,03	1,08	1,08	1,11	1,07

Pyrolyse von Weizenstroh (2296) bei 800 °C im Fallrohrreaktor unter Variation des Systemdrucks (Körnung: 0,2…0,5 mm)

Tab Anhang E - 4: Produktverteilung bei der Pyrolyse von Weizenstroh (2296) in der Druckpyrolyseanlage (Fallrohrbetrieb) bei 800 °C und verschiedenen Drücken (Körnung: 0,2…0,5 mm)

Temperatur in °C	800	800	800	800	800	800	800
Temperatur (Anhaftung im RR) in °C	700	675	450	470	667	460	560
Druck (Mittelwert) in bar	**1,1**	**5,0**	**7,0**	**10,0**	**14,7**	**19,7**	**29,9**
Ausbeuten				in Ma.-% (wf)			
Pyrolysegas	49,0	41,6	41,3	42,7	41,0	48,1	44,7
Kondensat	15,8	21,1	14,4	10,7	8,7	9,8	13,8
Koks (RR)	30,8	33,4	43,6	46,3	49,0	40,4	40,5
Koks (KAB)	4,4	4,0	0,6	0,3	1,2	1,7	1,1
Koks, gesamt	35,2	37,4	44,2	46,6	50,2	42,1	41,5
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang E - 5: Zusammensetzung von Koks und Gas bei der Pyrolyse von Weizenstroh (2296) in der Druckpyrolyseanlage (Fallrohrbetrieb) bei 800 °C und verschiedenen Drücken (Körnung: 0,2…0,5 mm)

Temperatur in °C	800	800	800	800	800	800	800
Temperatur (Anhaftung im RR) in °C	700	675	450	470	667	460	560
Druck (Mittelwert) in bar	**1,1**	**5,0**	**7,0**	**10,0**	**14,7**	**19,7**	**29,9**
Koks (KAB)				in Ma.-% (wf)			
A	18,9	17,0	15,7	-	14,0	13,9	14,6
FB	28,4	35,6	41,1	-	50,1	48,3	46,2
Cfix	52,7	47,4	43,2	-	35,9	37,9	39,1
Summe	100,0	100,0	100,0	-	100,0	100,0	100,0
C	63,0	60,5	58,9	-	57,5	56,1	57,0
H	3,4	3,8	4,3	-	4,6	4,6	4,5
N	0,8	0,7	0,7	-	0,7	0,7	0,7
O+SC	13,9	18,0	20,4	-	23,2	24,7	23,1
Summe	100,0	100,0	100,0	-	100,0	100,0	100,0
Koks (KAB)				in Ma.-% (wf)			
A	35,2	-	-	-	-	-	-
FB	15,0	-	-	-	-	-	-
Cfix	49,8	-	-	-	-	-	-
Summe	100,0	-	-	-	-	-	-
C	56,9	-	-	-	-	-	-
H	1,3	-	-	-	-	-	-
N	0,8	-	-	-	-	-	-
O+SC	5,9	-	-	-	-	-	-
Summe	100,0	-	-	-	-	-	-
Pyrolysegas				in Ma.-% (wf)			
C	39,5	36,7	37,3	37,7	37,3	36,6	36,9
H	4,3	4,1	4,4	4,9	5,2	5,1	5,5
N	0,0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0
O+SC	56,2	58,3	56,4	54,4	53,5	53,2	51,6
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang E - 6: Gaszusammensetzung und -ausbeuten bei der Pyrolyse von Weizenstroh (2296) in der Druckpyrolyseanlage (Fallrohrbetrieb) bei 800 °C und verschiedenen Drücken (Körnung: 0,2…0,5 mm)

Temperatur in °C	800	800	800	800	800	800	800
Temperatur (Anhaftung im RR) in °C	700	675	450	470	667	460	560
Druck (Mittelwert) in bar	**1,1**	**5,0**	**7,0**	**10,0**	**14,7**	**19,7**	**29,9**
Gaszusammensetzung	in Vol.-%						
H2	15,79	19,63	19,39	21,28	23,10	23,70	23,57
Methan	14,89	14,24	16,58	18,60	19,84	19,38	21,88
CO	26,87	23,60	24,46	24,34	21,91	20,51	19,11
CO2	35,51	38,91	36,74	33,85	34,11	35,66	35,25
Ethin	0,55	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H2S	0,10	0,08	0,03	0,03	0,00	0,00	0,00
COS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Propin	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ethan	0,36	0,26	0,32	0,36	0,28	0,19	0,08
Ethen	5,28	3,08	2,45	1,53	0,76	0,56	0,11
Propan	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Propen	0,32	0,04	0,04	0,02	0,00	0,00	0,00
i-Butan	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
N-Butan	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Summe	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Gasausbeute	in l i.N./kg (wf)						
H2	61,76	66,32	66,50	78,93	84,27	100,82	94,38
Methan	58,24	48,10	56,83	69,00	72,36	82,46	87,61
CO	105,12	79,73	83,86	90,28	79,95	87,27	76,51
CO2	138,94	131,45	125,98	125,55	124,44	151,74	141,15
Ethin	2,14	0,53	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H2S	0,39	0,28	0,09	0,10	0,00	0,00	0,00
COS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Propin	0,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ethan	1,40	0,87	1,10	1,34	1,03	0,81	0,33
Ethen	20,67	10,40	8,39	5,68	2,76	2,39	0,42
Propan	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Propen	1,26	0,15	0,12	0,06	0,00	0,00	0,00
i-Butan	0,79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
N-Butan	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Summe	391,21	337,83	342,86	370,95	364,81	425,48	400,40
Gasdichte in kJ/m^3 i.N.	1,25	1,23	1,20	1,15	1,12	1,13	1,12

Anhang F Ergebnisse zum Einfluss der Aufheizgeschwindigkeit auf die Biomassepyrolyse

Pyrolyse von Weizenstroh (2275) bei 400 und 500 °C im Festbettreaktor unter Variation der Aufheizgeschwindigkeit (Körnung: < 2 mm)

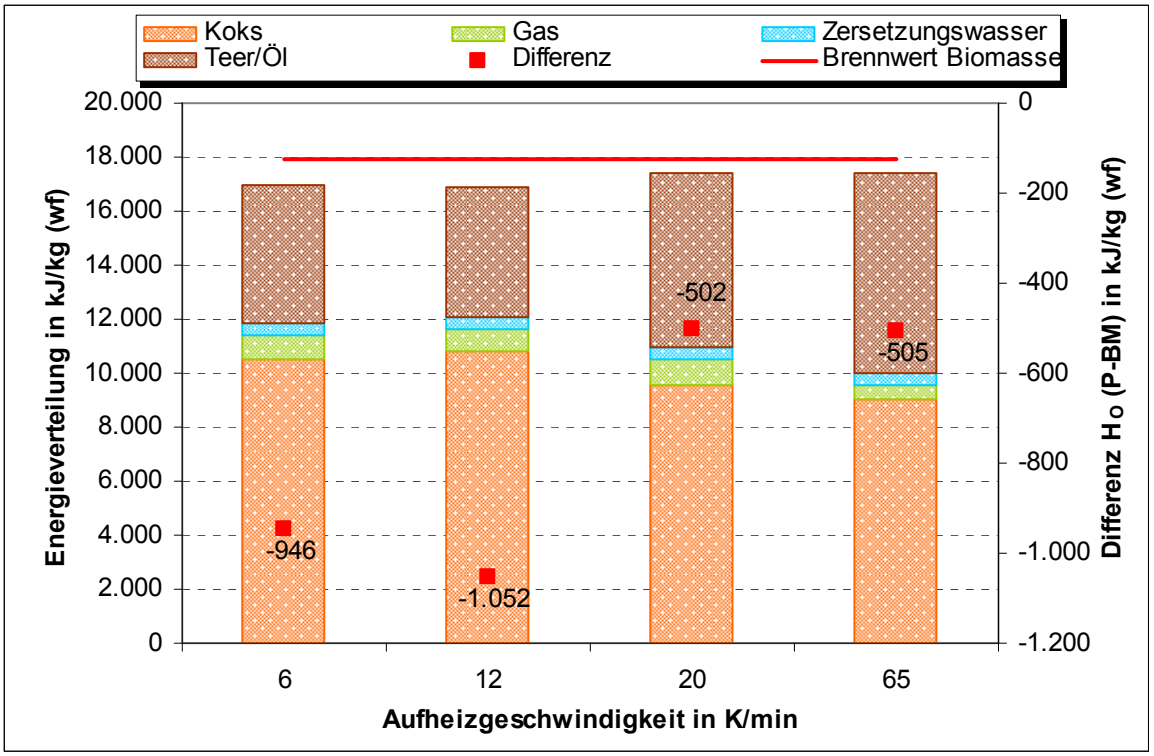


Abb Anhang F - 1: **Einfluss der Aufheizrate auf die Verteilung der chemisch gebundenen Energie des Einsatzstoffes auf die Produkte bei der Weizenstrohpyrolyse (2275) bei 400 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm)**

Tab Anhang F - 1: **Produktverteilung bei der Weizenstrohpyrolyse (2275) bei 400 und 500 °C und verschiedenen Aufheizgeschwindigkeiten im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm)**

Temperatur in °C	407	402	401	406	501	500	504	509	506
Aufheizrate in K/min	**6**	**12**	**20**	**65**	**5**	**11**	**21**	**79**	**84**
Ausbeuten	in Ma.-% (wf)								
Koks	43,0	44,2	39,6	36,7	33,0	33,0	32,4	32,5	32,2
Kondensat	35,8	36,7	41,0	47,1	45,5	43,2	43,8	47,3	47,1
Teer/Öl	18,2	18,8	22,7	29,5	24,6	22,9	23,9	27,2	27,7
Zersetzungswasser	17,7	17,9	18,3	17,6	20,9	20,4	19,9	20,1	19,4
Gas	21,1	19,1	19,4	16,1	21,5	23,7	23,8	20,2	20,7
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Ausbeuten	in Ma.-% (waf)								
Koks	38,0	39,3	34,3	31,1	27,1	27,1	26,4	26,5	26,2
Kondensat	39,0	40,0	44,6	51,3	49,5	47,1	47,7	51,5	51,3
Teer/Öl	19,8	20,4	24,7	32,1	26,8	24,9	26,0	29,6	30,1
Zersetzungswasser	19,2	19,5	20,0	19,2	22,7	22,2	21,7	21,9	21,1
Gas	23,0	20,8	21,1	17,6	23,4	25,8	25,9	22,0	22,6
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang F - 2: Produktzusammensetzung bei der Weizenstrohpyrolyse (2275) bei 400 und 500 °C und verschiedenen Aufheizgeschwindigkeiten im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm)

Temperatur in °C	407	402	401	406	501	500	504	509	506
Aufheizrate in K/min	**6**	**12**	**20**	**65**	**5**	**11**	**21**	**79**	**84**
Koks				in Ma.-% (wf)					
A	19,0	18,4	20,6	22,2	24,7	24,7	25,2	25,1	25,3
FB	28,9	29,7	28,9	26,5	15,7	15,0	15,7	19,9	19,8
Cfix	52,1	51,8	50,5	51,3	59,6	60,3	59,2	55,0	54,8
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
C	63,5	63,4	62,8	63,9	69,1	69,1	67,8	66,1	65,9
H	3,7	3,8	3,6	3,5	2,5	2,4	2,2	2,7	2,6
N	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
O+SC	13,1	13,7	12,4	9,7	3,1	3,1	4,2	5,5	5,4
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Pyrolysegas				in Ma.-% (wf)					
C	33,0	33,3	33,7	32,0	34,3	34,2	34,1	33,2	33,1
H	0,7	0,7	0,9	0,3	1,7	1,8	1,9	1,1	1,0
N	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
O+SC	66,3	66,1	65,4	67,7	64,0	64,0	64,0	65,7	65,9
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Kondensat, gesamt				in Ma.-% (wf)					
A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C	31,4	30,4	34,6	35,9	33,9	33,8	35,3	36,7	37,2
H	10,7	10,3	9,7	9,0	9,6	10,0	10,1	9,5	9,6
N	0,9	0,9	0,9	0,8	0,9	0,9	1,0	0,9	0,9
O+SC	56,9	58,3	54,8	54,3	55,6	55,2	53,7	52,9	52,4
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Teer/Öl				in Ma.-% (wf)					
A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C	62,0	59,5	62,6	57,4	62,5	64,0	64,7	63,9	63,3
H	10,2	9,5	8,5	7,7	8,3	9,0	9,1	8,2	8,5
N	1,9	1,8	1,6	1,3	1,7	1,8	1,8	1,5	1,4
O+SC	26,0	29,2	27,3	33,6	27,5	25,2	24,4	26,4	26,8
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Zersetzungswasser				in Ma.-% (wf)					
H	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2
O	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang F - 3: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff enthaltenen Elemente auf die Produkte bei der Weizenstrohpyrolyse (2275) bei 400 und 500 °C und verschiedenen Aufheizgeschwindigkeiten im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm)

Temperatur in °C	407	402	401	406	501	500	504	509	506
Aufheizrate in K/min	**6**	**12**	**20**	**65**	**5**	**11**	**21**	**79**	**84**
C-Verteilung					in %				
Koks	60,0	61,6	54,6	51,5	50,1	50,1	48,2	47,2	46,5
Kondensat,gesamt	24,7	24,5	31,1	37,1	33,8	32,1	34,0	38,1	38,4
Zersetzungswasser	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Teer/Öl	24,7	24,5	31,1	37,1	33,8	32,1	34,0	38,1	38,4
Gas	15,3	13,9	14,3	11,3	16,1	17,8	17,8	14,7	15,1
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
H-Verteilung					in %				
Koks	28,8	29,8	25,5	22,9	14,8	14,4	12,9	15,8	15,3
Kondensat,gesamt	68,8	67,9	71,4	76,3	78,6	77,9	79,1	80,3	81,0
Zersetzungswasser	35,5	36,0	36,8	35,4	41,9	40,9	40,0	40,4	39,0
Teer/Öl	33,3	31,9	34,6	40,8	36,7	37,0	39,1	40,0	42,0
Gas	2,5	2,3	3,1	0,8	6,6	7,7	8,1	3,9	3,7
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
N-Verteilung					in %				
Koks	46,7	47,0	41,9	40,8	34,6	35,2	33,7	36,4	36,7
Kondensat,gesamt	53,3	53,0	58,1	59,2	65,4	64,8	66,3	63,6	63,3
Zersetzungswasser	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Teer/Öl	53,3	53,0	58,1	59,2	65,4	64,8	66,3	63,6	63,3
Gas	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
O(+SC)-Verteilung					in %				
Koks	14,0	15,1	12,2	8,9	2,5	2,5	3,3	4,4	4,3
Kondensat,gesamt	50,9	53,4	56,0	63,8	63,1	59,5	58,6	62,4	61,5
Zersetzungswasser	39,3	39,9	40,8	39,2	46,4	45,3	44,2	44,7	43,2
Teer/Öl	11,6	13,5	15,3	24,6	16,7	14,2	14,4	17,7	18,3
Gas	35,1	31,5	31,7	27,4	34,4	38,0	38,1	33,2	34,2
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang F - 4: Energieinhalte der Produkte und „Reaktionsenthalpie“ bei der Weizenstrohpyrolyse (2275) bei 400 und 500 °C und verschiedenen Aufheizgeschwindigkeiten im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm)

Temperatur in °C	407	402	401	406	501	500	504	509	506
Aufheizrate in K/min	**6**	**12**	**20**	**65**	**5**	**11**	**21**	**79**	**84**
Koks					in kJ/kg (wf)				
Brennwert	24.505	24.407	24.137	24.558	25.650	25.516	24.900	24.681	24.717
Heizwert	23.692	23.590	23.357	23.801	25.107	24.988	24.419	24.095	24.140
Pyrolysegas					in kJ/kg (wf)				
Brennwert	4.256	4.429	4.911	3.317	6.165	6.272	6.358	4.746	4.694
Heizwert	4.172	4.343	4.793	3.280	5.925	6.015	6.085	4.608	4.561
Kondensat, gesamt					in kJ/kg (wf)				
Brennwert	15.487	14.290	16.881	16.715	16.571	17.083	17.413	17.027	18.030
Heizwert	13.364	12.287	14.765	14.701	14.442	14.908	15.274	14.974	15.989
Teer/Öl					in kJ/kg (wf)				
Brennwert	28.165	25.611	28.564	25.247	28.535	30.118	29.874	27.806	28.978
Heizwert	26.351	24.028	26.712	23.489	26.671	28.182	27.987	26.040	27.219
Zersetzungswasser					in kJ/kg (wf)				
Brennwert	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442
Heizwert	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\Delta_R H_{Chem}$ (P-BM)					in kJ/kg (wf)				
Brennwert	-946	-1.052	-502	-505	-602	-634	-727	-901	-520
Heizwert	-860	-951	-487	-523	-588	-595	-671	-876	-480
Koks					in kJ/kg (waf)				
Brennwert	30.237	29.924	30.392	31.565	34.060	33.880	33.269	32.936	33.102
Heizwert	29.234	28.922	29.409	30.592	33.338	33.178	32.626	32.154	32.328
$\Delta_R H_{Chem}$ (P-BM)					in kJ/kg (waf)				
Brennwert	-1.030	-1.146	-547	-550	-656	-690	-792	-981	-566
Heizwert	-937	-1.035	-530	-570	-640	-648	-730	-954	-522

Tab Anhang F - 5: Prozentuale Verteilung der chemisch gebundenen Energie bei der Weizenstrohpyrolyse (2275) bei 400 und 500 °C und verschiedenen Aufheizgeschwindigkeiten im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm)

Temperatur in °C	407	402	401	406	501	500	504	509	506
Aufheizrate in K/min	**6**	**12**	**20**	**65**	**5**	**11**	**21**	**79**	**84**
Koks					in % (wf)				
Brennwert	58,8	60,2	53,3	50,3	47,2	47,0	45,0	44,8	44,4
Heizwert	60,9	62,4	55,3	52,3	49,6	49,4	47,3	46,9	46,5
Pyrolysegas					in % (wf)				
Brennwert	5,0	4,7	5,3	3,0	7,4	8,3	8,4	5,3	5,4
Heizwert	5,3	4,9	5,6	3,2	7,6	8,5	8,7	5,6	5,7
Kondensat, gesamt					in % (wf)				
Brennwert	30,9	29,2	38,6	43,9	42,0	41,2	42,5	44,9	47,3
Heizwert	28,6	27,0	36,2	41,4	39,3	38,5	40,0	42,3	45,0
Teer/Öl					in % (wf)				
Brennwert	28,5	26,8	36,1	41,5	39,2	38,4	39,8	42,1	44,7
Heizwert	28,6	27,0	36,2	41,4	39,3	38,5	40,0	42,3	45,0
Zersetzungswasser					in % (wf)				
Brennwert	2,4	2,4	2,5	2,4	2,8	2,8	2,7	2,7	2,6
Heizwert	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
$\Delta_R H_{Chem}$ (P-BM)					in % (wf)				
Brennwert	-5,3	-5,9	-2,8	-2,8	-3,4	-3,5	-4,1	-5,0	-2,9
Heizwert	-5,1	-5,7	-2,9	-3,1	-3,5	-3,6	-4,0	-5,2	-2,9

Tab Anhang F - 6: Gaszusammensetzung und Gasausbeuten bei der Weizenstrohpyrolyse (2275) bei 400 und 500 °C und verschiedenen Aufheizgeschwindigkeiten im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm)

Temperatur in °C	407	402	401	406	501	500	504	509	506
Aufheizrate in K/min	**6**	**12**	**20**	**65**	**5**	**11**	**21**	**79**	**84**
Gaszusammensetzung	in Vol.-%								
H2	0,38	0,33	0,59	0,42	3,84	5,30	7,28	1,05	1,15
Methan	2,52	2,66	3,43	1,91	8,66	8,85	8,71	6,09	5,92
CO	33,78	36,13	34,55	35,65	29,25	28,79	28,60	30,81	31,79
CO2	60,80	58,48	58,15	61,62	55,36	54,42	53,08	60,06	59,40
Ethin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H2S	0,00	0,01	0,03	0,01	0,03	0,02	0,01	0,01	0,00
COS	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
Propin	0,44	0,21	0,30	0,01	0,00	0,02	0,01	0,07	0,07
Ethan	0,91	1,00	1,41	0,19	1,58	1,46	1,16	0,98	1,04
Ethen	0,70	0,76	0,94	0,05	0,39	0,35	0,43	0,49	0,27
Propan	0,19	0,16	0,21	0,06	0,39	0,35	0,30	0,29	0,21
Propen	0,26	0,25	0,32	0,07	0,43	0,38	0,37	0,11	0,12
i-Butan	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00
N-Butan	0,02	0,02	0,04	0,00	0,06	0,05	0,04	0,03	0,01
Summe	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Gasausbeute	in l i.N./kg (wf)								
H2	0,48	0,38	0,70	0,40	5,24	8,16	11,44	1,39	1,46
Methan	3,17	3,05	4,01	1,83	11,78	13,60	13,69	7,70	7,47
CO	42,48	41,41	40,45	34,17	40,05	44,18	44,97	37,67	40,16
CO2	76,45	67,03	68,09	59,06	75,65	83,55	83,47	73,61	75,01
Ethin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H2S	0,00	0,01	0,03	0,01	0,04	0,02	0,02	0,01	0,01
COS	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00
Propin	0,55	0,24	0,35	0,00	0,01	0,03	0,01	0,10	0,08
Ethan	1,14	1,14	1,66	0,18	2,15	2,24	1,83	1,31	1,32
Ethen	0,87	0,87	1,11	0,05	0,53	0,54	0,68	0,56	0,34
Propan	0,23	0,18	0,25	0,06	0,53	0,54	0,47	0,36	0,27
Propen	0,33	0,29	0,37	0,07	0,58	0,59	0,59	0,11	0,16
i-Butan	0,01	0,00	0,01	0,00	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01
N-Butan	0,02	0,02	0,05	0,00	0,08	0,07	0,06	0,03	0,01
Summe	125,75	114,62	117,08	95,85	136,64	153,56	157,25	122,86	126,32
Gasdichte in kJ/m^3 i.N.	1,68	1,66	1,66	1,68	1,57	1,54	1,51	1,64	1,64

Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) bei 400 und 500 °C im Festbettreaktor unter Variation der Aufheizgeschwindigkeit (Körnung: < 2 mm)

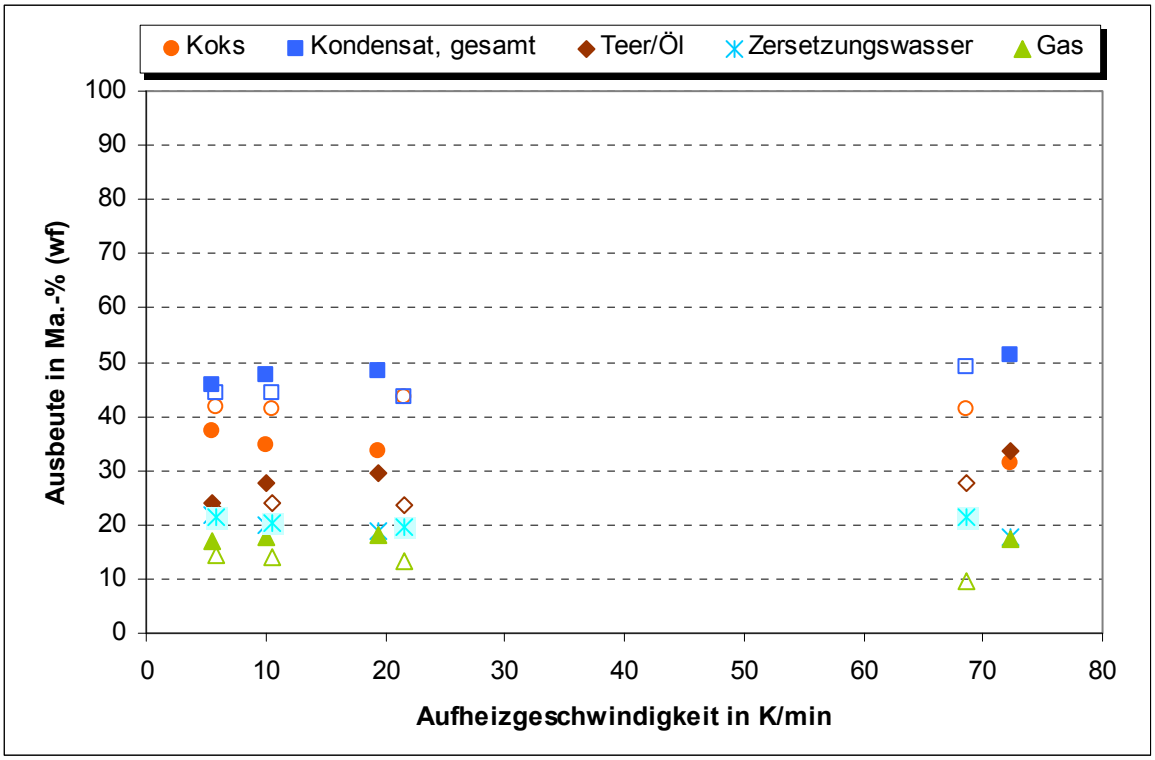


Abb Anhang F - 2: **Einfluss der Aufheizrate auf die Produktverteilung bei der Waldrestholzpyrolyse (2472) im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm)** *(500 °C: volle Zeichen; 400 °C: umrandete Zeichen)*

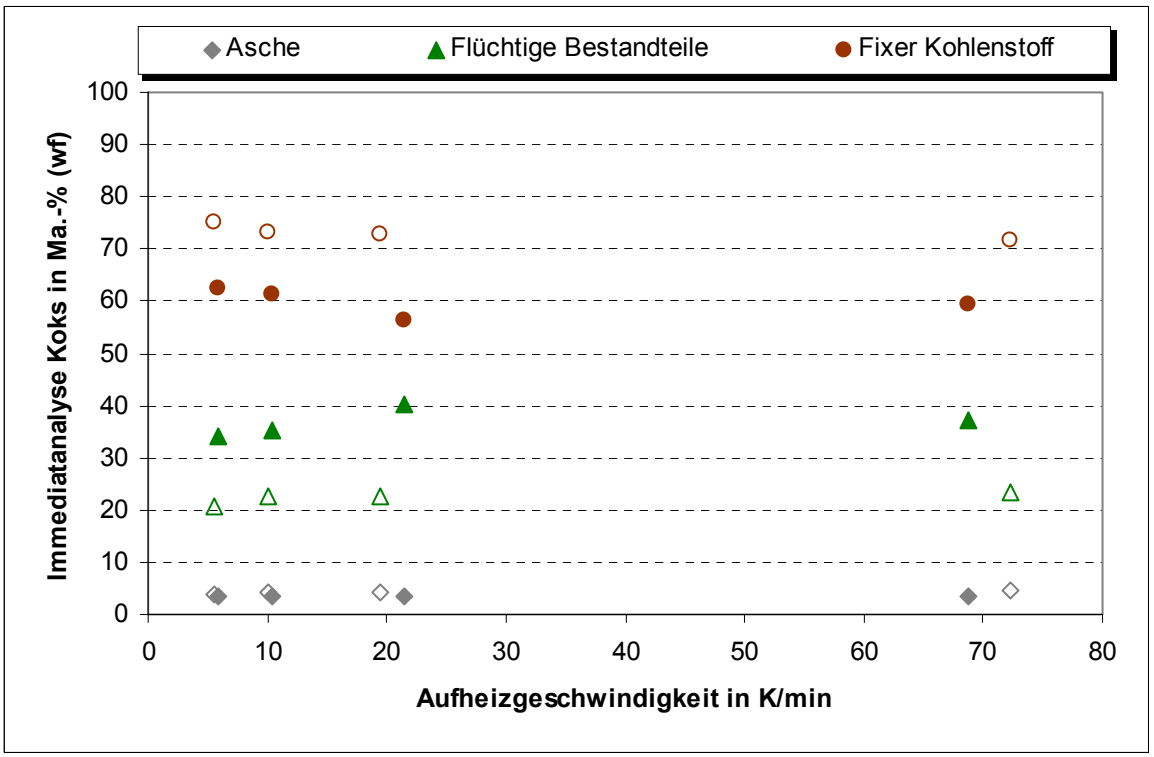


Abb Anhang F - 3: **Einfluss der Aufheizrate auf die Immediatanalyse des Kokses bei der Waldrestholzpyrolyse (2472) im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm)** *(500 °C: volle Zeichen; 400 °C: umrandete Zeichen)*

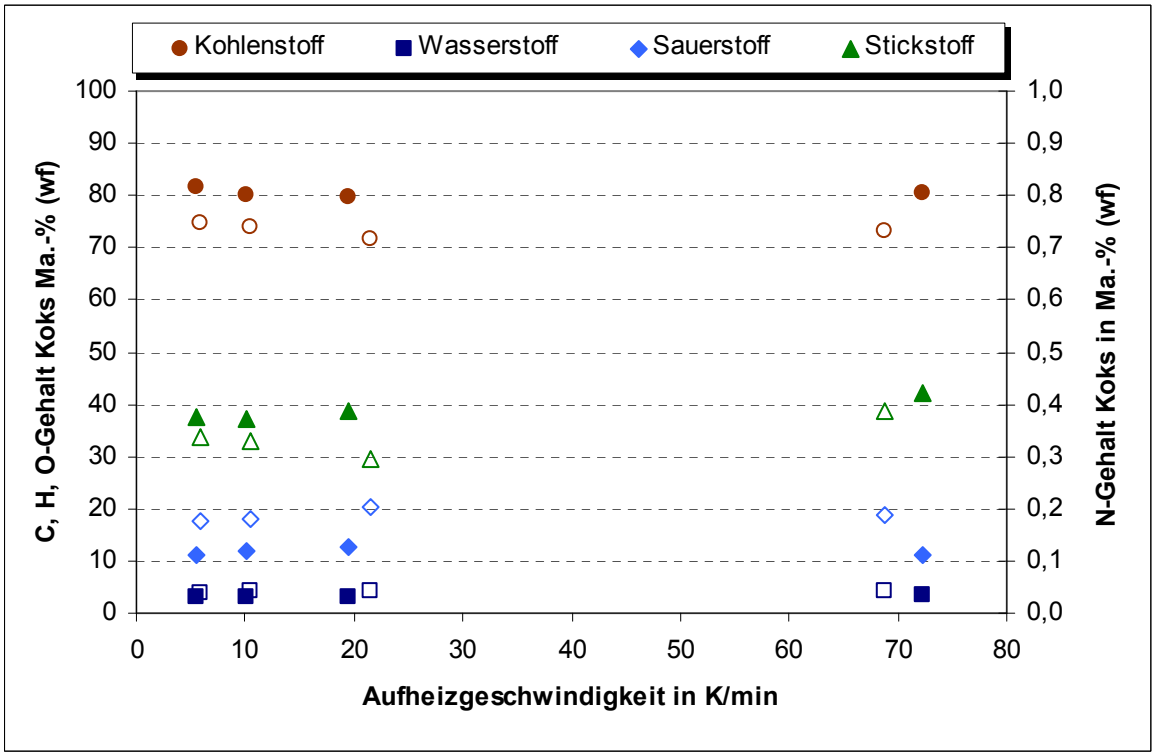


Abb Anhang F - 4: **Einfluss der Aufheizrate auf die Elementarzusammensetzung des Kokses bei der Waldrestholzpyrolyse (2472) im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm)** *(500 °C: volle Zeichen; 400 °C: umrandete Zeichen)*

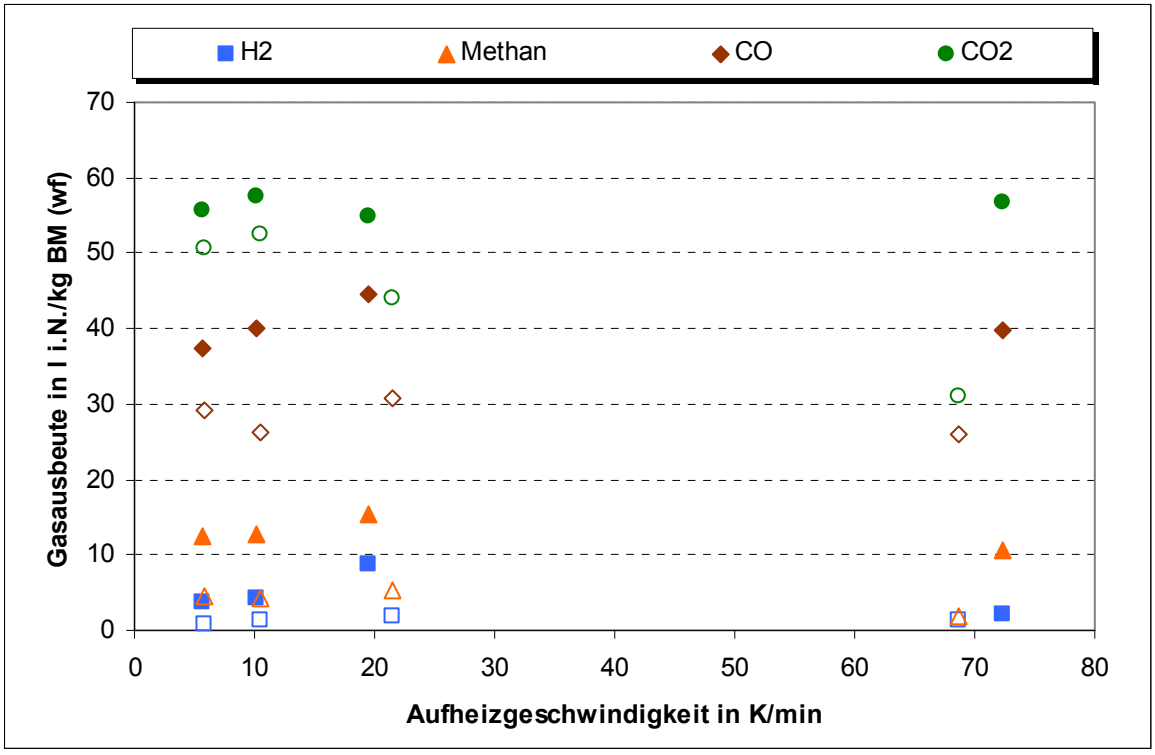


Abb Anhang F - 5: **Einfluss der Aufheizrate auf die Ausbeuten der Hauptgaskomponenten bei der Waldrestholzpyrolyse (2472) im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm)** *(500 °C: volle Zeichen; 400 °C: umrandete Zeichen)*

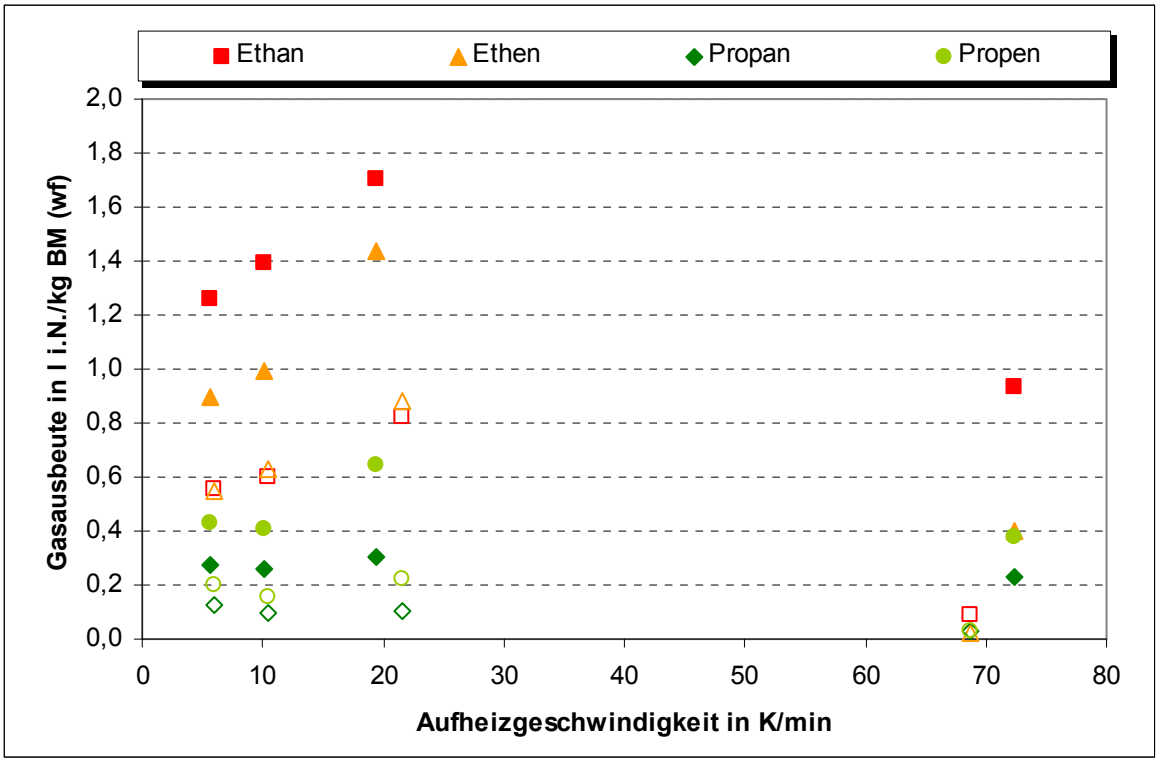


Abb Anhang F - 6: **Einfluss der Aufheizrate auf die Ausbeuten an C2- und C3-Kohlenwasserstoffen bei der Waldrestholzpyrolyse (2472) im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm)** *(500 °C: volle Zeichen; 400 °C: umrandete Zeichen)*

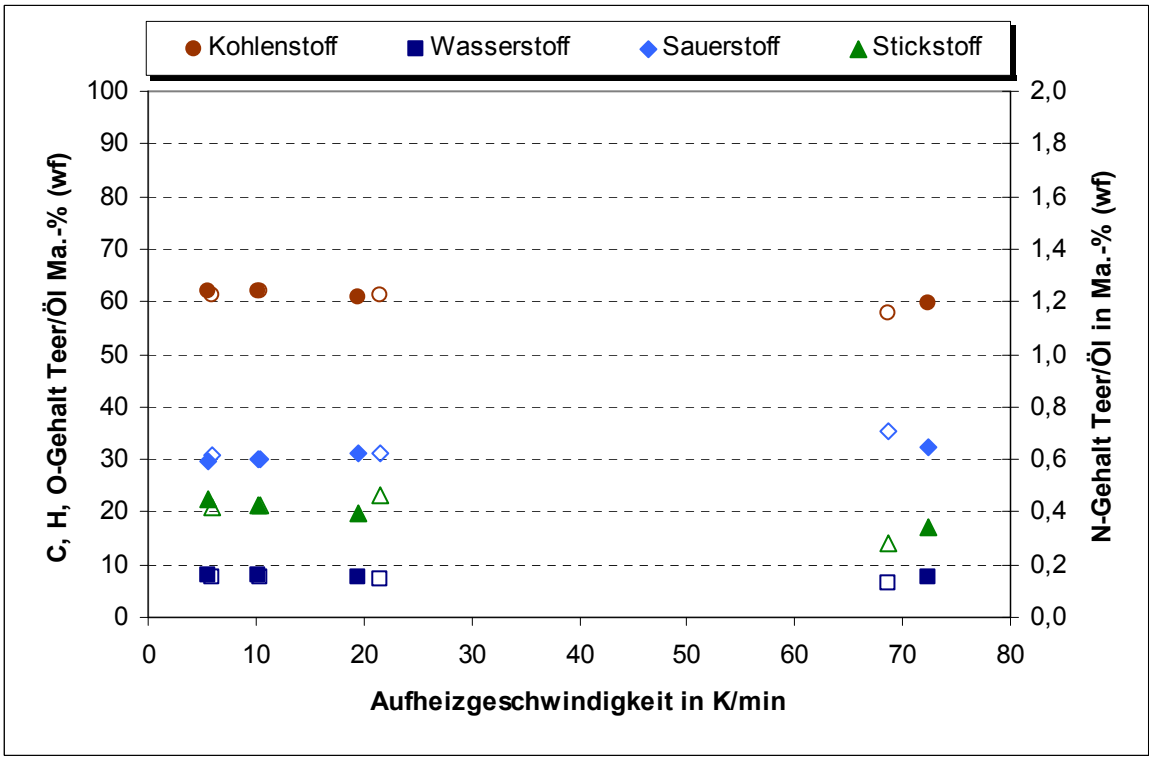


Abb Anhang F - 7: **Einfluss der Aufheizrate auf die Elementarzusammensetzung des Teer/Öl bei der Waldrestholzpyrolyse (2472) im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm)** *(500 °C: volle Zeichen; 400 °C: umrandete Zeichen)*

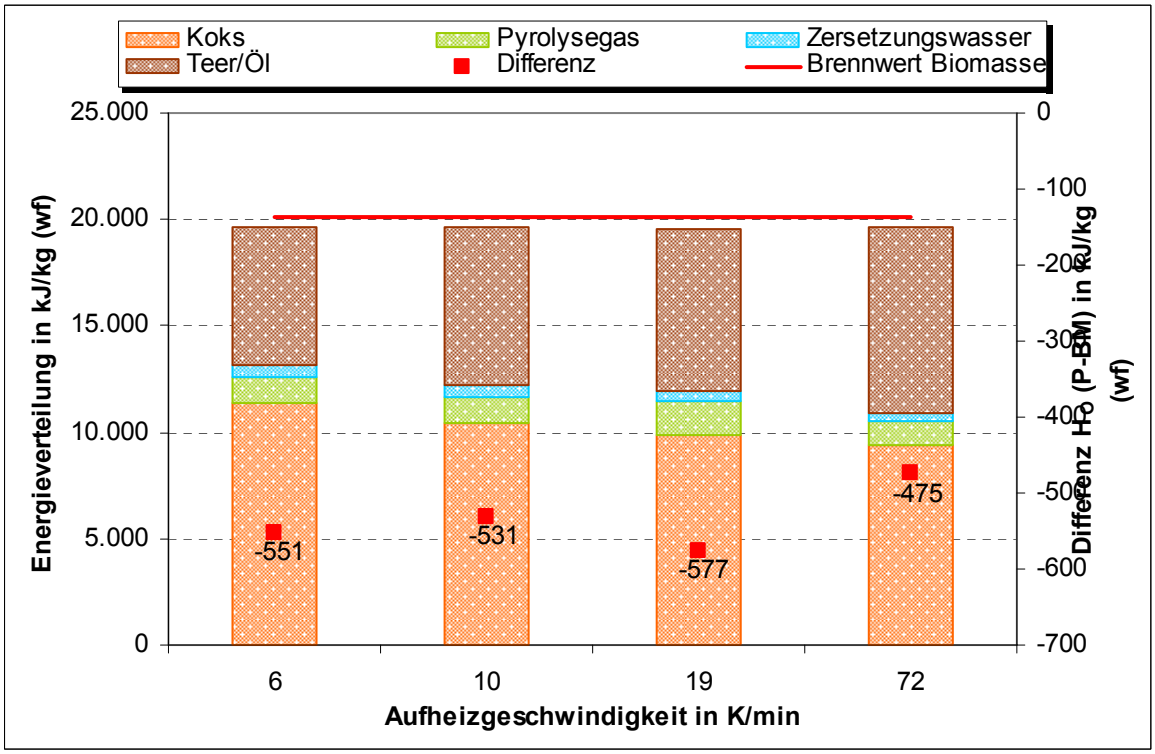


Abb Anhang F - 8: **Einfluss der Aufheizrate auf die Verteilung der chemisch gebundenen Energie des Einsatzstoffes auf die Produkte bei der Waldrestholzpyrolyse (2472) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm)**

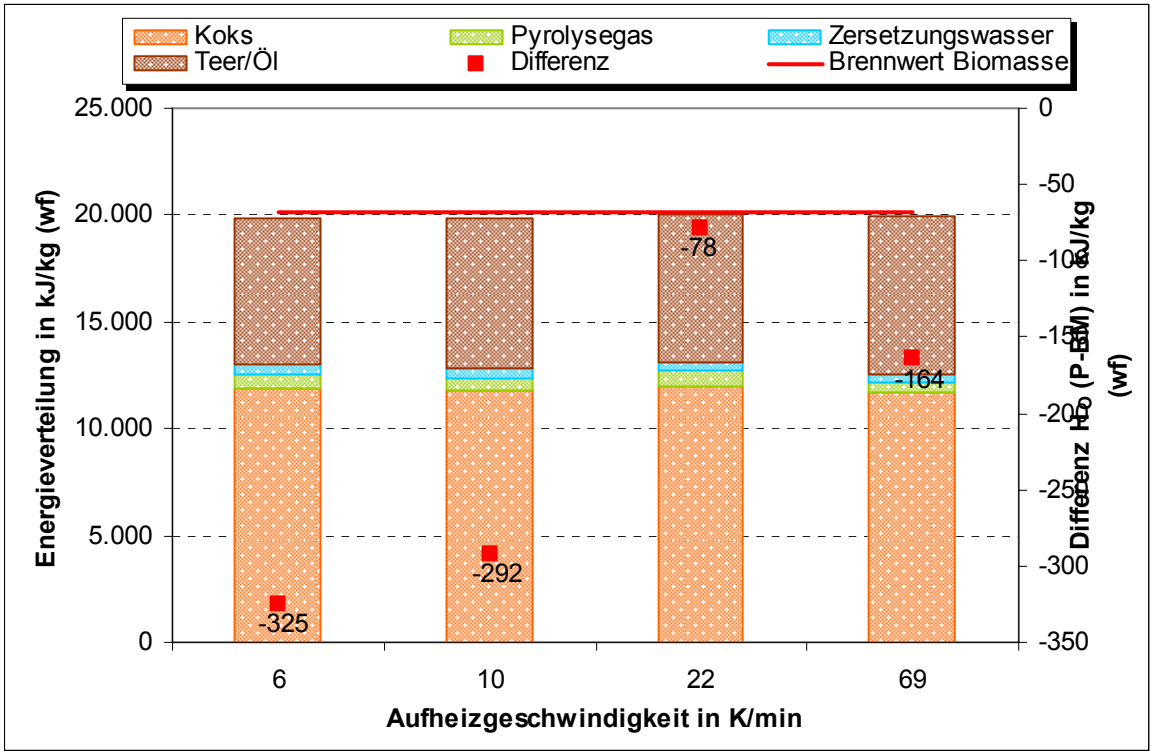


Abb Anhang F - 9: **Einfluss der Aufheizrate auf die Verteilung der chemisch gebundenen Energie des Einsatzstoffes auf die Produkte bei der Waldrestholzpyrolyse (2472) bei 400 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm)**

Tab Anhang F - 7: Produktverteilung bei der Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) bei 400 und 500 °C und verschiedenen Aufheizgeschwindigkeiten im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm)

Temperatur in °C	402	402	402	399	501	501	499	505
Aufheizrate in K/min	**6**	**10**	**22**	**69**	**6**	**10**	**19**	**72**
Ausbeuten	in Ma.-% (wf)							
Koks	41,6	41,4	43,4	41,4	37,3	34,7	33,5	31,3
Kondensat	44,2	44,4	43,4	49,0	45,7	47,5	48,3	51,5
Teer/Öl	25,5	25,8	25,7	30,7	24,0	27,7	29,5	33,7
Zersetzungswasser	18,8	18,5	17,8	18,3	21,7	19,8	18,8	17,8
Gas	14,2	14,2	13,2	9,6	17,0	17,8	18,2	17,3
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Ausbeuten	in Ma.-% (waf)							
Koks	40,7	40,6	42,5	40,6	36,3	33,8	32,5	30,2
Kondensat	44,9	45,0	44,1	49,7	46,4	48,2	49,0	52,2
Teer/Öl	25,8	26,2	26,0	31,2	24,4	28,1	29,9	34,2
Zersetzungswasser	19,0	18,8	18,0	18,5	22,0	20,1	19,1	18,0
Gas	14,4	14,4	13,4	9,7	17,3	18,0	18,5	17,5
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang F - 8: Produktzusammensetzung bei der Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) bei 400 und 500 °C und verschiedenen Aufheizgeschwindigkeiten im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm)

Temperatur in °C	402	402	402	399	501	501	499	505
Aufheizrate in K/min	**6**	**10**	**22**	**69**	**6**	**10**	**19**	**72**
Koks				in Ma.-% (wf)				
A	3,5	3,5	3,3	3,5	3,9	4,2	4,3	4,6
FB	34,2	35,1	40,3	37,2	20,8	22,7	22,8	23,5
Cfix	62,3	61,4	56,4	59,3	75,3	73,1	72,9	71,8
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
C	74,6	73,9	71,6	73,2	81,5	80,3	79,6	80,4
H	4,0	4,1	4,3	4,4	3,1	3,2	3,2	3,3
N	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
O+SC	17,5	18,1	20,4	18,6	11,1	12,0	12,5	11,3
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Pyrolysegas				in Ma.-% (wf)				
C	33,2	32,7	34,4	33,4	35,4	35,5	36,7	34,8
H	0,9	0,9	1,2	0,5	2,0	1,9	2,5	1,5
N	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
O+SC	65,9	66,4	64,4	66,1	62,6	62,6	60,8	63,7
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Kondensat, gesamt				in Ma.-% (wf)				
A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C	35,2	36,1	36,2	36,3	32,6	36,1	37,2	39,2
H	9,1	9,0	8,8	8,1	9,5	9,2	8,9	8,8
N	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
O+SC	55,4	54,6	54,8	55,4	57,6	54,5	53,6	51,8
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Teer/Öl				in Ma.-% (wf)				
A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C	61,2	62,0	61,2	57,9	62,1	61,9	60,9	59,8
H	7,6	7,5	7,1	6,3	8,0	7,8	7,4	7,6
N	0,4	0,4	0,5	0,3	0,4	0,4	0,4	0,3
O+SC	30,8	30,1	31,2	35,5	29,5	29,9	31,2	32,2
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Zersetzungswasser				in Ma.-% (wf)				
H	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2
O	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang F - 9: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff enthaltenen Elemente auf die Produkte bei der Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) bei 400 und 500 °C und verschiedenen Aufheizgeschwindigkeiten im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm)

Temperatur in °C	402	402	402	399	501	501	499	505
Aufheizrate in K/min	**6**	**10**	**22**	**69**	**6**	**10**	**19**	**72**
C-Verteilung				in %				
Koks	60,5	59,7	60,5	59,1	59,2	54,3	51,9	49,0
Kondensat,gesamt	30,3	31,2	30,6	34,7	29,1	33,4	35,0	39,3
Zersetzungswasser	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Teer/Öl	30,3	31,2	30,6	34,7	29,1	33,4	35,0	39,3
Gas	9,2	9,0	8,9	6,2	11,8	12,3	13,0	11,7
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
H-Verteilung				in %				
Koks	28,6	29,3	32,1	30,9	20,0	19,0	18,5	17,7
Kondensat,gesamt	69,2	68,6	65,1	68,2	74,3	75,1	73,6	77,8
Zersetzungswasser	36,0	35,5	34,1	35,0	41,5	38,0	36,0	34,0
Teer/Öl	33,3	33,1	31,1	33,2	32,7	37,1	37,6	43,8
Gas	2,1	2,1	2,8	0,9	5,7	5,9	7,8	4,5
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
N-Verteilung				in %				
Koks	56,8	55,7	51,7	65,2	56,5	52,4	52,7	53,4
Kondensat,gesamt	43,2	44,3	48,3	34,8	43,5	47,6	47,3	46,6
Zersetzungswasser	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Teer/Öl	43,2	44,3	48,3	34,8	43,5	47,6	47,3	46,6
Gas	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
O(+SC)-Verteilung				in %				
Koks	17,7	18,2	21,5	18,7	10,1	10,1	10,1	8,6
Kondensat,gesamt	59,5	58,9	57,8	65,9	64,0	62,8	62,9	64,7
Zersetzungswasser	40,5	40,0	38,3	39,4	46,8	42,7	40,6	38,3
Teer/Öl	19,0	18,9	19,5	26,5	17,2	20,1	22,4	26,4
Gas	22,8	22,9	20,7	15,4	25,9	27,0	26,9	26,7
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang F - 10: Energieinhalte der Produkte und „Reaktionsenthalpie“ bei der Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) bei 400 und 500 °C und verschiedenen Aufheizgeschwindigkeiten im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm)

Temperatur in °C	402	402	402	399	501	501	499	505
Aufheizrate in K/min	**6**	**10**	**22**	**69**	**6**	**10**	**19**	**72**
Koks				in kJ/kg (wf)				
Brennwert	28.563	28.410	27.587	28.257	30.561	30.019	29.585	30.177
Heizwert	27.687	27.509	26.644	27.306	29.877	29.321	28.880	29.456
Pyrolysegas				in kJ/kg (wf)				
Brennwert	4.621	4.314	5.738	4.504	7.128	7.152	8.581	6.262
Heizwert	4.503	4.200	5.569	4.431	6.846	6.872	8.197	6.049
Kondensat, gesamt				in kJ/kg (wf)				
Brennwert	16.513	16.853	16.939	16.026	15.318	16.695	16.792	17.808
Heizwert	14.477	14.759	14.872	14.183	13.266	14.692	14.848	15.933
Teer/Öl				in kJ/kg (wf)				
Brennwert	26.891	27.189	26.981	24.104	26.939	26.890	25.936	25.902
Heizwert	25.155	25.345	25.174	22.616	25.238	25.201	24.309	24.326
Zersetzungswasser				in kJ/kg (wf)				
Brennwert	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442
Heizwert	0	0	0	0	0	0	0	0
$\Delta_R H_{Chem}$ (P-BM)				in kJ/kg (wf)				
Brennwert	-325	-292	-78	-164	-551	-531	-577	-475
Heizwert	-332	-337	-134	-195	-519	-501	-549	-428
Koks				in kJ/kg (waf)				
Brennwert	29.593	29.438	28.539	29.279	31.795	31.324	30.921	31.641
Heizwert	28.686	28.504	27.564	28.294	31.084	30.596	30.184	30.885
$\Delta_R H_{Chem}$ (P-BM)				in kJ/kg (waf)				
Brennwert	-330	-296	-80	-166	-559	-538	-586	-482
Heizwert	-337	-342	-136	-198	-526	-508	-557	-435

Tab Anhang F - 11: Prozentuale Verteilung der chemisch gebundenen Energie bei der Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) bei 400 und 500 °C und verschiedenen Aufheizgeschwindigkeiten im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm)

Temperatur in °C	402	402	402	399	501	501	499	505
Aufheizrate in K/min	**6**	**10**	**22**	**69**	**6**	**10**	**19**	**72**
Koks				in % (wf)				
Brennwert	58,9	58,4	59,4	58,1	56,5	51,7	49,1	46,8
Heizwert	60,9	60,4	61,2	59,9	59,0	53,9	51,2	48,8
Pyrolysegas				in % (wf)				
Brennwert	3,3	3,0	3,8	2,1	6,0	6,3	7,8	5,4
Heizwert	3,4	3,2	3,9	2,2	6,2	6,5	7,9	5,5
Kondensat, gesamt				in % (wf)				
Brennwert	36,2	37,1	36,5	39,0	34,7	39,3	40,2	45,5
Heizwert	33,9	34,7	34,2	36,8	32,1	37,0	38,0	43,4
Teer/Öl				in % (wf)				
Brennwert	34,0	34,9	34,3	36,8	32,1	36,9	38,0	43,3
Heizwert	33,9	34,7	34,2	36,8	32,1	37,0	38,0	43,4
Zersetzungswasser				in % (wf)				
Brennwert	2,3	2,2	2,2	2,2	2,6	2,4	2,3	2,2
Heizwert	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
$\Delta_R H_{Chem}$ (P-BM)				in % (wf)				
Brennwert	-1,6	-1,4	-0,4	-0,8	-2,7	-2,6	-2,9	-2,4
Heizwert	-1,8	-1,8	-0,7	-1,0	-2,7	-2,7	-2,9	-2,3

Tab Anhang F - 12: Gaszusammensetzung, Ausbeuten der Gaskomponenten und Gasdichte bei der Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) bei 400 und 500 °C und verschiedenen Aufheizgeschwindigkeiten im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm)

Temperatur in °C	402	402	402	399	501	501	499	505
Aufheizrate in K/min	**6**	**10**	**22**	**69**	**6**	**10**	**19**	**72**
Gaszusammensetzung				in Vol.-%				
H2	1,04	1,48	2,26	2,03	3,34	3,59	6,82	1,87
Methan	5,18	4,82	6,30	3,18	11,18	10,79	11,98	9,56
CO	33,58	30,61	36,59	43,13	33,33	34,12	34,89	35,70
CO2	58,50	61,30	52,38	51,37	49,56	48,86	43,05	51,12
Ethin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H2S	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
COS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Propin	0,04	0,04	0,03	0,00	0,02	0,02	0,03	0,00
Ethan	0,64	0,70	0,98	0,15	1,12	1,19	1,34	0,84
Ethen	0,63	0,74	1,05	0,04	0,80	0,84	1,13	0,36
Propan	0,14	0,11	0,12	0,04	0,25	0,22	0,24	0,21
Propen	0,23	0,18	0,27	0,05	0,38	0,35	0,50	0,34
i-Butan	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,00
N-Butan	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,02	0,02	0,01
Summe	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Gasausbeute				in l i.N./kg (wf)				
H2	0,90	1,27	1,90	1,23	3,74	4,22	8,71	2,07
Methan	4,49	4,13	5,29	1,92	12,54	12,68	15,30	10,62
CO	29,13	26,22	30,69	26,05	37,41	40,13	44,57	39,68
CO2	50,74	52,51	43,94	31,02	55,61	57,46	55,00	56,81
Ethin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H2S	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
COS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Propin	0,03	0,03	0,03	0,00	0,03	0,03	0,04	0,00
Ethan	0,56	0,60	0,82	0,09	1,26	1,40	1,71	0,93
Ethen	0,55	0,63	0,88	0,02	0,90	0,99	1,44	0,40
Propan	0,12	0,10	0,10	0,03	0,28	0,26	0,30	0,23
Propen	0,20	0,16	0,22	0,03	0,43	0,41	0,64	0,37
i-Butan	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,00
N-Butan	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,02	0,02	0,01
Summe	86,74	85,65	83,89	60,39	112,21	117,60	127,75	111,13
Gasdichte in kJ/m^3 i.N.	1,64	1,66	1,58	1,58	1,52	1,51	1,43	1,55

Pyrolyse von Maissilage (2475), Triticale-Ganzpflanze (2471), Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 500 °C im Festbettreaktor unter Variation der Aufheizgeschwindigkeit (Körnung: < 2 mm)

Tab Anhang F - 13: Produktverteilung bei der Pyrolyse von Maissilage (2475), Triticale-Ganzpflanze (2471) und Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 500 °C und verschiedenen Aufheizgeschwindigkeiten im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm)

Rohstoff	Maissilage 2475				Triticale-Ganzpflanze 2471				Sägerestholz (Fichte, rindefrei) 2276				
Temperatur in °C	501	501	502	505	500	502	502	500	519	500	501	505	508
Aufheizrate in K/min	**6**	**10**	**19**	**70**	**6**	**10**	**21**	**77**	**5**	**12**	**24**	**70**	**83**
Ausbeuten	in Ma.-% (wf)				in Ma.-% (wf)				in Ma.-% (wf)				
Koks	35,0	34,2	29,5	27,4	31,1	31,3	30,8	27,8	29,1	27,9	25,1	25,0	25,9
Kondensat	47,6	48,8	52,7	55,8	50,0	49,7	50,0	54,3	50,6	52,6	56,0	61,1	60,8
Teer/Öl	23,5	26,0	32,3	33,2	28,5	27,9	29,0	32,1	28,4	31,8	37,9	42,1	42,1
Zersetzungswasser	24,1	22,8	20,4	22,5	21,5	21,8	21,1	22,2	22,2	20,8	18,1	19,0	18,7
Gas	17,4	17,0	17,8	16,9	18,9	19,0	19,2	17,9	20,4	19,5	18,9	13,9	13,3
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Ausbeuten	in Ma.-% (waf)				in Ma.-% (waf)				in Ma.-% (waf)				
Koks	32,1	31,4	26,4	24,2	27,9	28,1	27,6	24,4	28,8	27,6	24,8	24,8	25,7
Kondensat	49,7	50,9	55,0	58,2	52,3	52,0	52,4	56,9	50,7	52,8	56,2	61,3	61,0
Teer/Öl	24,5	27,1	33,7	34,7	29,8	29,2	30,3	33,6	28,5	31,9	38,0	42,3	42,3
Zersetzungswasser	25,1	23,8	21,3	23,5	22,5	22,8	22,1	23,3	22,3	20,9	18,2	19,1	18,7
Gas	18,2	17,7	18,6	17,6	19,8	19,9	20,1	18,7	20,5	19,6	19,0	13,9	13,3
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang F - 14: Produktzusammensetzung bei der Pyrolyse von Maissilage (2475), Triticale-Ganzpflanze (2471) und Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 500 °C und verschiedenen Aufheizgeschwindigkeiten im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm)

Rohstoff	Maissilage 2475				Triticale-Ganzpflanze 2471				Sägerestholz (Fichte, rindenfrei) 2276				
Temperatur in °C	501	501	502	505	500	502	502	500	519	500	501	505	508
Aufheizrate in K/min	**6**	**10**	**19**	**70**	**6**	**10**	**21**	**77**	**5**	**12**	**24**	**70**	**83**
Koks	in Ma.-% (wf)				in Ma.-% (wf)				in Ma.-% (wf)				
A	11,9	12,2	14,1	15,2	14,5	14,4	14,6	16,2	1,1	1,2	1,3	1,3	1,3
FB	17,7	19,8	20,9	16,0	17,0	19,7	20,9	18,5	18,5	20,1	19,6	24,1	26,4
Cfix	70,4	68,0	65,0	68,8	68,5	65,9	64,4	65,3	80,3	78,7	79,1	74,6	72,4
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
C	73,6	72,0	70,5	73,4	72,2	71,1	69,1	72,1	87,3	86,1	84,9	82,1	79,8
H	3,1	3,3	3,3	2,9	3,1	3,1	3,2	2,9	3,2	3,2	3,2	3,5	3,6
N	1,9	1,9	1,8	2,0	1,8	1,8	1,8	1,9	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
O+SC	9,5	10,6	10,3	6,4	8,4	9,5	11,3	6,9	8,2	9,3	10,4	12,9	15,1
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Pyrolysegas	in Ma.-% (wf)				in Ma.-% (wf)				in Ma.-% (wf)				
C	34,4	34,1	34,6	33,1	34,7	34,8	35,0	33,6	36,3	35,8	37,3	36,0	35,9
H	1,4	1,1	1,3	0,9	1,4	1,4	1,5	0,9	2,3	1,9	2,6	1,7	1,6
N	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
O+SC	64,2	64,8	64,1	65,9	63,9	63,8	63,6	65,5	61,4	62,3	60,1	62,3	62,5
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Kondensat, gesamt	in Ma.-% (wf)				in Ma.-% (wf)				in Ma.-% (wf)				
A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C	30,6	32,5	36,7	37,0	34,3	34,8	36,4	37,1	35,4	37,4	39,9	41,1	41,5
H	10,1	9,8	9,3	9,3	9,5	9,5	9,4	9,2	9,3	9,2	8,6	8,2	8,2
N	0,8	0,9	1,0	0,9	0,9	0,9	1,0	0,9	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3
O+SC	58,5	56,8	53,0	52,8	55,2	54,7	53,3	52,8	54,9	53,1	51,2	50,4	50,1
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Teer/Öl	in Ma.-% (wf)				in Ma.-% (wf)				in Ma.-% (wf)				
A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C	62,0	61,0	60,0	62,1	60,2	62,1	62,8	62,7	63,1	61,9	58,9	59,7	59,8
H	8,9	8,6	8,1	7,9	8,3	8,2	8,1	7,8	7,9	7,9	7,4	6,8	6,8
N	1,7	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,7	1,6	0,6	0,6	0,5	0,5	0,4
O+SC	27,4	28,7	30,3	28,4	29,9	28,1	27,4	27,9	28,4	29,6	33,2	33,1	32,9
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Zersetzungswasser	in Ma.-% (wf)				in Ma.-% (wf)				in Ma.-% (wf)				
H	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2
O	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang F - 15: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff enthaltenen Elemente auf die Produkte bei der Pyrolyse von Maissilage (2475), Triticale-Ganzpflanze (2471) und Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 500 °C und verschiedenen Aufheizgeschwindigkeiten im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm)

Rohstoff	Maissilage 2475				Triticale-Ganzpflanze 2471				Sägerestholz (Fichte, rindefrei) 2276				
Temperatur in °C	501	501	502	505	500	502	502	500	519	500	501	505	508
Aufheizrate in K/min	**6**	**10**	**19**	**70**	**6**	**10**	**21**	**77**	**5**	**12**	**24**	**70**	**83**
C-Verteilung		in %				in %				in %			
Koks	55,6	53,3	44,9	43,4	48,6	48,2	46,1	43,4	50,1	47,4	42,0	40,5	40,8
Kondensat, gesamt	31,5	34,3	41,8	44,5	37,1	37,5	39,4	43,6	35,3	38,8	44,1	49,6	49,8
Zersetzungswasser	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Teer/Öl	31,5	34,3	41,8	44,5	37,1	37,5	39,4	43,6	35,3	38,8	44,1	49,6	49,8
Gas	13,0	12,5	13,3	12,1	14,2	14,3	14,5	13,0	14,6	13,8	13,9	9,9	9,4
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
H-Verteilung		in %				in %				in %			
Koks	17,7	18,5	16,1	12,9	15,9	16,4	16,5	13,6	15,0	14,7	12,9	14,4	15,4
Kondensat, gesamt	78,4	78,4	80,0	84,5	79,7	79,0	78,8	83,6	77,2	79,3	78,9	81,7	81,1
Zersetzungswasser	44,1	41,8	37,4	41,3	40,2	40,8	39,5	41,6	40,7	38,2	33,2	34,8	34,2
Teer/Öl	34,3	36,6	42,7	43,2	39,5	38,2	39,3	42,0	36,6	41,1	45,7	46,9	46,9
Gas	3,9	3,2	3,9	2,6	4,3	4,5	4,7	2,8	7,7	6,1	8,1	3,9	3,5
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
N-Verteilung		in %				in %				in %			
Koks	62,5	60,8	50,5	51,8	55,2	55,4	53,2	50,3	22,4	19,0	23,0	18,7	20,8
Kondensat, gesamt	37,5	39,2	49,5	48,2	44,8	44,6	46,8	49,7	77,6	81,0	77,0	81,3	79,2
Zersetzungswasser	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Teer/Öl	37,5	39,2	49,5	48,2	44,8	44,6	46,8	49,7	77,6	81,0	77,0	81,3	79,2
Gas	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
O(+SC)-Verteilung		in %				in %				in %			
Koks	7,8	8,6	7,1	4,2	6,2	7,0	8,2	4,6	5,6	6,1	6,1	7,6	9,2
Kondensat, gesamt	65,7	65,5	65,9	69,6	65,2	64,3	63,0	67,8	65,1	65,4	67,2	72,2	71,4
Zersetzungswasser	50,5	47,8	42,8	47,3	45,1	45,7	44,2	46,6	46,2	43,4	37,8	39,6	38,9
Teer/Öl	15,2	17,6	23,1	22,3	20,1	18,5	18,7	21,2	18,9	22,1	29,5	32,6	32,5
Gas	26,4	25,9	27,0	26,2	28,6	28,7	28,8	27,7	29,3	28,5	26,6	20,2	19,4
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang F - 16: Energieinhalte der Produkte und „Reaktionsenthalpie“ bei der Pyrolyse von Maissilage (2475), Triticale-Ganzpflanze (2471) und Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 500 °C und verschiedenen Aufheizgeschwindigkeiten im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm)

Rohstoff	Maissilage 2475				Triticale-Ganzpflanze 2471				Sägerestholz (Fichte, rindefrei) 2276				
Temperatur in °C	501	501	502	505	500	502	502	500	519	500	501	505	508
Aufheizrate in K/min	**6**	**10**	**19**	**70**	**6**	**10**	**21**	**77**	**5**	**12**	**24**	**70**	**83**
Koks	in kJ/kg (wf)				in kJ/kg (wf)				in kJ/kg (wf)				
Brennwert	28.010	27.565	26.962	27.743	27.339	27.043	26.354	27.233	32.765	32.561	32.138	31.115	30.504
Heizwert	27.335	26.845	26.236	27.114	26.671	26.358	25.658	26.594	32.075	31.860	31.449	30.345	29.687
Pyrolysegas	in kJ/kg (wf)				in kJ/kg (wf)				in kJ/kg (wf)				
Brennwert	5.877	5.436	5.963	4.688	6.052	6.132	6.329	4.927	8.027	7.339	9.126	7.249	6.577
Heizwert	5.691	5.283	5.778	4.561	5.865	5.937	6.125	4.803	7.682	7.055	8.710	6.999	6.375
Kondensat, gesamt	in kJ/kg (wf)				in kJ/kg (wf)				in kJ/kg (wf)				
Brennwert	14.600	15.444	16.682	17.650	16.020	16.147	17.091	18.005	17.181	17.437	18.405	19.460	19.140
Heizwert	12.514	13.382	14.797	15.559	13.967	14.125	15.038	15.864	15.128	15.412	16.534	17.533	17.182
Teer/Öl	in kJ/kg (wf)				in kJ/kg (wf)				in kJ/kg (wf)				
Brennwert	27.053	26.855	25.688	27.972	26.250	26.852	27.755	28.774	28.723	27.267	26.050	27.146	26.541
Heizwert	25.331	25.126	24.155	26.118	24.490	25.159	25.985	26.840	26.974	25.517	24.453	25.452	24.796
Zersetzungswasser	in kJ/kg (wf)				in kJ/kg (wf)				in kJ/kg (wf)				
Brennwert	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442
Heizwert	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\Delta_R H_{Chem}$ (P-BM)	in kJ/kg (wf)				in kJ/kg (wf)				in kJ/kg (wf)				
Brennwert	-791	-662	-755	-330	-601	-606	-373	-20	131	-28	380	972	706
Heizwert	-719	-607	-661	-357	-567	-558	-351	-80	156	-11	414	901	610
Koks	in kJ/kg (waf)				in kJ/kg (waf)				in kJ/kg (waf)				
Brennwert	31.794	31.378	31.389	32.716	31.964	31.587	30.863	32.489	33.142	32.951	32.567	31.531	30.898
Heizwert	31.028	30.559	30.544	31.974	31.183	30.787	30.048	31.727	32.443	32.242	31.869	30.751	30.071
$\Delta_R H_{Chem}$ (P-BM)	in kJ/kg (waf)				in kJ/kg (waf)				in kJ/kg (waf)				
Brennwert	-826	-691	-787	-345	-630	-634	-391	-21	132	-28	381	975	708
Heizwert	-750	-633	-689	-372	-594	-584	-368	-84	156	-11	416	904	612

Tab Anhang F - 17: Prozentuale Verteilung der chemisch gebundenen Energie bei der Pyrolyse von Maissilage (2475), Triticale-Ganzpflanze (2471) und Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 500 °C und verschiedenen Aufheizgeschwindigkeiten im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm)

Rohstoff	Maissilage 2475				Triticale-Ganzpflanze 2471				Sägerestholz (Fichte, rindefrei) 2276				
Temperatur in °C	501	501	502	505	500	502	502	500	519	500	501	505	508
Aufheizrate in K/min	**6**	**10**	**19**	**70**	**6**	**10**	**21**	**77**	**5**	**12**	**24**	**70**	**83**
Koks		in % (wf)				in % (wf)				in % (wf)			
Brennwert	52,8	50,9	42,9	40,9	46,6	46,4	44,5	41,5	48,3	46,0	40,9	39,5	40,1
Heizwert	55,5	53,4	44,9	43,1	48,9	48,7	46,6	43,7	50,7	48,3	42,9	41,3	41,9
Pyrolysegas		in % (wf)				in % (wf)				in % (wf)			
Brennwert	5,5	5,0	5,7	4,3	6,3	6,4	6,6	4,8	8,3	7,3	8,8	5,1	4,4
Heizwert	5,8	5,2	6,0	4,5	6,5	6,7	6,9	5,1	8,5	7,5	9,0	5,3	4,6
Kondensat, gesamt		in % (wf)				in % (wf)				in % (wf)			
Brennwert	37,4	40,6	47,4	53,0	43,8	43,9	46,8	53,6	44,1	46,6	52,3	60,4	59,1
Heizwert	34,6	37,9	45,3	50,4	41,2	41,4	44,4	50,8	41,6	44,1	50,4	58,3	56,9
Teer/Öl		in % (wf)				in % (wf)				in % (wf)			
Brennwert	34,3	37,6	44,7	50,1	41,0	41,0	44,0	50,6	41,3	44,0	50,1	58,0	56,7
Heizwert	34,6	37,9	45,3	50,4	41,2	41,4	44,4	50,8	41,6	44,1	50,4	58,3	56,9
Zersetzungswasser		in % (wf)				in % (wf)				in % (wf)			
Brennwert	3,2	3,0	2,7	3,0	2,9	2,9	2,8	3,0	2,8	2,6	2,2	2,4	2,3
Heizwert	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
$\Delta_B H_{Chem}$ (P-BM)		in % (wf)				in % (wf)				in % (wf)			
Brennwert	-4,3	-3,6	-4,1	-1,8	-3,3	-3,3	-2,0	-0,1	0,7	-0,1	1,9	4,9	3,6
Heizwert	-4,2	-3,5	-3,8	-2,1	-3,3	-3,3	-2,1	-0,5	0,8	-0,1	2,3	4,9	3,3

Tab Anhang F - 18: Gaszusammensetzung, Ausbeuten der Gaskomponenten und Gasdichte bei der Pyrolyse von Maissilage (2475), Triticale-Ganzpflanze (2471) und Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 500 °C und verschiedenen Aufheizgeschwindigkeiten im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm)

Rohstoff	Maissilage 2475				Triticale-Ganzpflanze 2471				Sägerestholz (Fichte, rindefrei) 2276				
Temperatur in °C	501	501	502	505	500	502	502	500	519	500	501	505	508
Aufheizrate in K/min	**6**	**10**	**19**	**70**	**6**	**10**	**21**	**77**	**5**	**12**	**24**	**70**	**83**
Gaszusammensetzung	in Vol.-%				in Vol.-%				in Vol.-%				
H2	1,53	1,39	2,30	2,26	1,50	1,71	2,54	1,03	4,15	4,21	7,65	1,76	1,12
Methan	6,46	5,08	5,61	4,58	6,67	6,64	6,56	5,06	13,36	10,45	12,99	11,09	9,23
CO	32,90	34,62	34,74	32,84	35,58	35,04	35,79	36,22	34,73	37,87	38,53	41,51	41,55
CO2	55,50	55,66	53,58	58,33	52,93	53,07	51,49	55,82	45,51	45,54	38,48	44,11	46,58
Ethin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00
H2S	0,09	0,06	0,04	0,07	0,05	0,04	0,04	0,03	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
COS	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Propin	0,20	0,12	0,08	0,00	0,08	0,08	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
Ethan	1,58	1,43	1,70	0,64	1,54	1,67	1,60	1,03	1,09	0,89	0,88	0,81	0,73
Ethen	0,84	1,03	1,30	0,65	0,95	0,98	1,22	0,38	0,38	0,51	0,77	0,40	0,36
Propan	0,39	0,26	0,25	0,31	0,30	0,32	0,25	0,20	0,28	0,20	0,18	0,15	0,16
Propen	0,44	0,30	0,36	0,27	0,35	0,40	0,38	0,21	0,42	0,33	0,47	0,14	0,26
i-Butan	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00
N-Butan	0,05	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,02	0,01	0,05	0,02	0,01	0,01	0,00
Summe	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Gasausbeute	in l i.N./kg (wf)				in l i.N./kg (wf)				in l i.N./kg (wf)				
H2	1,65	1,46	2,57	2,34	1,79	2,05	3,10	1,13	5,82	5,66	10,50	1,66	1,00
Methan	6,99	5,33	6,29	4,74	7,93	7,95	8,01	5,58	18,60	14,07	17,84	10,20	8,26
CO	35,60	36,27	38,93	33,97	42,34	41,95	43,73	39,90	48,21	50,42	52,89	38,30	37,19
CO2	60,06	58,32	60,04	60,33	63,00	63,53	62,92	61,51	63,13	60,51	52,83	41,01	41,69
Ethin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00
H2S	0,10	0,06	0,04	0,07	0,06	0,05	0,05	0,03	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
COS	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Propin	0,21	0,12	0,08	0,00	0,10	0,10	0,11	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00
Ethan	1,71	1,49	1,91	0,66	1,83	2,00	1,95	1,13	1,52	1,19	1,20	0,75	0,65
Ethen	0,91	1,08	1,46	0,67	1,13	1,18	1,50	0,42	0,53	0,67	1,05	0,37	0,33
Propan	0,42	0,28	0,28	0,32	0,36	0,38	0,30	0,22	0,39	0,26	0,25	0,14	0,15
Propen	0,48	0,31	0,41	0,28	0,41	0,48	0,47	0,23	0,59	0,44	0,65	0,15	0,23
i-Butan	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00
N-Butan	0,05	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,03	0,01	0,07	0,02	0,02	0,01	0,00
Summe	108,21	104,78	112,07	103,44	119,01	119,71	122,20	110,18	138,88	133,26	137,28	92,61	89,50
Gasdichte in kJ/m^3 i.N.	1,61	1,62	1,59	1,63	1,59	1,59	1,57	1,62	1,47	1,48	1,38	1,49	1,53

Anhang G Ergebnisse zum Einfluss der Verweilzeit bei Endtemperatur bei der Biomassepyrolyse

Tab Anhang G - 1: Produktverteilung bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 380 und 550 °C sowie verschiedenen Verweilzeiten bei Endtemperatur im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Haltezeit in min	**0**	**10**	**30**	**0**	**10**	**30**
Temperatur in °C	380	386	377	553	570	554
Aufheizrate in K/min	38	31	41	82	75	72
Ausbeuten			in Ma.-% (wf)			
Koks	39,6	35,2	34,7	23,5	22,7	23,1
Kondensat	50,0	53,6	54,0	62,3	62,5	61,0
Teer/Öl	31,4	34,4	34,5	42,8	41,8	40,8
Zersetzungswasser	18,6	19,2	19,5	19,6	20,6	20,2
Gas	10,5	11,2	11,3	14,1	14,8	15,9
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Ausbeuten			in Ma.-% (waf)			
Koks	39,4	35,0	34,5	23,3	22,5	22,8
Kondensat	50,1	53,8	54,2	62,6	62,7	61,2
Teer/Öl	31,5	34,2	33,9	41,9	40,5	39,1
Zersetzungswasser	18,6	19,6	20,3	20,7	22,2	22,1
Gas	10,5	11,3	11,3	14,2	14,9	16,0
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang G - 2: Produktzusammensetzung bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 380 und 550 °C sowie verschiedenen Verweilzeiten bei Endtemperatur im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Haltezeit in min	**0**	**10**	**30**	**0**	**10**	**30**
Temperatur in °C	380	386	377	553	570	554
Aufheizrate in K/min	38	31	41	82	75	72
Koks			in Ma.-% (wf)			
A	0,8	0,9	1,0	1,4	1,5	1,4
FB	46,1	37,7	36,2	19,6	13,7	13,7
Cfix	53,0	61,4	62,9	79,0	84,9	84,9
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
C	73,5	77,0	77,5	85,8	90,1	90,2
H	4,9	4,6	4,6	3,3	2,9	2,9
N	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2
O+SC	20,5	17,4	16,9	9,3	5,3	5,3
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Pyrolysegas			in Ma.-% (wf)			
C	33,0	33,0	33,2	36,7	37,5	37,6
H	0,3	0,5	0,6	1,9	2,6	2,7
N	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
O+SC	66,7	66,5	66,2	61,4	59,8	59,8
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Kondensat, gesamt			in Ma.-% (wf)			
A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
C	36,2	37,1	37,0	40,6	39,4	39,1
H	8,3	8,3	8,3	8,1	8,1	8,2
N	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3
O+SC	55,2	54,3	54,4	51,0	52,2	52,4
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	101,0
Teer/Öl			in Ma.-% (wf)			
A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
C	57,7	57,8	58,0	59,1	58,8	58,4
H	6,5	6,6	6,6	6,7	6,6	6,8
N	0,5	0,6	0,5	0,5	0,4	0,5
O+SC	35,3	35,0	34,9	33,7	34,2	33,3
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Zersetzungswasser			in Ma.-% (wf)			
H	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	12,2
O	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8	89,8
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	102,0

Tab Anhang G - 3: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff enthaltenen Elemente auf die Produkte bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 380 und 550 °C sowie verschiedenen Verweilzeiten bei Endtemperatur im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Haltezeit in min	**0**	**10**	**30**	**0**	**10**	**30**
Temperatur in °C	380	386	377	553	570	554
Aufheizrate in K/min	38	31	41	82	75	72
C-Verteilung			in %			
Koks	57,4	53,5	53,1	39,8	40,4	41,1
Kondensat, gesamt	35,7	39,2	39,5	49,9	48,6	47,1
Zersetzungswasser	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
Teer/Öl	35,7	39,2	39,5	49,9	48,6	47,1
Gas	6,8	7,3	7,4	10,2	11,0	11,8
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
H-Verteilung			in %			
Koks	32,0	26,6	26,0	12,8	10,9	11,0
Kondensat, gesamt	67,5	72,5	72,9	82,8	82,7	82,0
Zersetzungswasser	34,0	35,1	35,7	35,8	37,7	36,9
Teer/Öl	33,5	37,4	37,2	46,9	45,0	45,1
Gas	0,5	0,9	1,1	4,4	6,4	7,0
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
N-Verteilung			in %			
Koks	32,5	15,2	19,6	17,4	21,7	21,1
Kondensat, gesamt	67,5	84,8	80,4	82,6	78,3	77,9
Zersetzungswasser	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
Teer/Öl	67,5	84,8	80,4	82,6	78,3	77,9
Gas	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
O(+SC)-Verteilung			in %			
Koks	19,0	14,3	13,7	5,1	2,8	2,9
Kondensat, gesamt	64,6	68,2	68,8	74,5	76,4	74,8
Zersetzungswasser	38,7	39,9	40,6	40,7	42,9	42,0
Teer/Öl	25,9	28,2	28,2	33,8	33,5	32,8
Gas	16,4	17,5	17,5	20,3	20,8	22,3
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang G - 4: Energieinhalte der Produkte und „Reaktionsenthalpie“ bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 380 und 550 °C sowie verschiedenen Verweilzeiten bei Endtemperatur im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Haltezeit in min	**0**	**10**	**30**	**0**	**10**	**30**
Temperatur in °C	380	386	377	553	570	554
Aufheizrate in K/min	38	31	41	82	75	72
Koks			in kJ/kg (wf)			
Brennwert	28.987	29.775	29.868	32.182	33.428	33.455
Heizwert	27.909	28.768	28.870	31.455	32.789	32.822
Pyrolysegas			in kJ/kg (wf)			
Brennwert	4.009	4.184	4.398	7.915	9.229	9.310
Heizwert	3.971	4.117	4.317	7.627	8.815	8.886
Kondensat, gesamt			in kJ/kg (wf)			
Brennwert	16.971	17.379	17.860	19.117	18.367	17.648
Heizwert	15.033	15.435	15.879	17.178	16.457	15.804
Teer/Öl			in kJ/kg (wf)			
Brennwert	25.573	25.715	26.584	26.740	26.213	25.162
Heizwert	23.934	24.048	24.864	25.031	24.566	23.614
Zersetzungswasser			in kJ/kg (wf)			
Brennwert	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442
Heizwert	0	0	0	0	0	0
$\Delta_R H_{Chem}$ (P-BM)			in kJ/kg (wf)			
Brennwert	656	544	800	893	722	255
Heizwert	590	474	707	806	657	250
Koks			in kJ/kg (waf)			
Brennwert	31.489	31.971	31.767	31.850	31.960	31.961
Heizwert	30.711	31.221	31.017	31.091	31.201	31.202
$\Delta_R H_{Chem}$ (P-BM)			in kJ/kg (waf)			
Brennwert	658	466	633	641	366	-174
Heizwert	592	394	536	546	288	-196

Tab Anhang G - 5: Prozentuale Verteilung der chemisch gebundenen Energie bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 380 und 550 °C sowie verschiedenen Verweilzeiten bei Endtemperatur im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Haltezeit in min	**0**	**10**	**30**	**0**	**10**	**30**
Temperatur in °C	380	386	377	553	570	554
Aufheizrate in K/min	38	31	41	82	75	72
Koks			in % (wf)			
Brennwert	58,2	53,1	52,6	38,4	38,5	39,2
Heizwert	60,1	55,1	54,5	40,2	40,5	41,2
Pyrolysegas			in % (wf)			
Brennwert	2,1	2,4	2,5	5,7	6,9	7,5
Heizwert	2,3	2,5	2,6	5,9	7,1	7,7
Kondensat, gesamt			in % (wf)			
Brennwert	43,0	47,2	48,9	60,5	58,2	54,6
Heizwert	40,9	45,0	46,7	58,3	55,9	52,4
Teer/Öl			in % (wf)			
Brennwert	40,7	44,9	46,5	58,0	55,6	52,1
Heizwert	40,9	45,0	46,7	58,3	55,9	52,4
Zersetzungswasser			in % (wf)			
Brennwert	2,3	2,4	2,4	2,4	2,6	2,5
Heizwert	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
$\Delta_R H_{Chem}$ (P-BM)			in % (wf)			
Brennwert	3,3	2,8	4,1	4,5	3,7	1,3
Heizwert	3,2	2,6	3,8	4,4	3,6	1,4

Tab Anhang G - 6: Gaszusammensetzung, Ausbeuten der Gaskomponenten und Gasdichte bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 380 und 550 °C sowie verschiedenen Verweilzeiten bei Endtemperatur im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Haltezeit in min	**0**	**10**	**30**	**0**	**10**	**30**
Temperatur in °C	380	386	377	553	570	554
Aufheizrate in K/min	38	31	41	82	75	72
Gaszusammensetzung			in Vol.-%			
H2	0,87	0,84	0,91	2,22	4,80	5,30
Methan	1,77	3,53	4,24	12,33	15,65	15,69
CO	43,88	40,10	39,78	43,34	40,17	39,76
CO2	53,25	55,15	54,60	40,65	37,83	37,68
Ethin	-	-	-	-	-	-
H2S	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
COS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Propin	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00
Ethan	0,09	0,18	0,22	0,84	0,92	0,92
Ethen	0,09	0,12	0,16	0,45	0,45	0,45
Propan	0,03	0,07	0,09	0,16	0,18	0,19
Propen	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
i-Butan	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
N-Butan	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Summe	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Gasausbeute			in l i.N./kg (wf)			
H2	0,56	0,58	0,63	2,15	5,13	6,11
Methan	1,15	2,45	2,96	11,96	16,71	18,11
CO	28,41	27,79	27,78	42,08	42,89	45,88
CO2	34,47	38,21	38,13	39,46	40,40	43,47
Ethin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H2S	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
COS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Propin	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
Ethan	0,06	0,12	0,16	0,82	0,98	1,06
Ethen	0,06	0,09	0,11	0,44	0,48	0,52
Propan	0,02	0,05	0,06	0,15	0,19	0,22
Propen	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
i-Butan	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
N-Butan	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Summe	64,73	69,28	69,84	97,07	106,78	115,38
Gasdichte in kJ/m^3 i.N.	1,62	1,62	1,61	1,46	1,39	1,38

Anhang H Ergebnisse zum Einfluss der Brennstoffvorbereitung bei der Biomassepyrolyse

Tab Anhang H - 1: Produktverteilung bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 500 °C und verschiedenen Partikelgrößen des Einsatzstoffes im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Partikelgröße in mm	**< 2 mm**	**0…1,25**	**1,25…2**	**2…3,15**	**3,15…5**
Temperatur in °C	506	503	502	502	504
Aufheizrate in K/min	73	72	75	73	76
Ausbeuten			in Ma.-% (wf)		
Koks	25,3	24,4	25,1	24,3	24,6
Kondensat	61,0	61,1	60,3	62,5	62,2
Teer/Öl	42,0	42,8	43,1	42,8	40,8
Zersetzungswasser	19,1	18,2	17,3	19,7	21,4
Gas	13,7	14,6	14,6	13,2	13,2
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Ausbeuten			in Ma.-% (waf)		
Koks	25,1	24,1	24,9	24,0	24,3
Kondensat	61,2	61,3	60,5	62,7	62,4
Teer/Öl	42,1	43,0	43,2	43,0	41,0
Zersetzungswasser	19,1	18,3	17,3	19,7	21,5
Gas	13,7	14,6	14,6	13,3	13,3
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang H - 2: Produktzusammensetzung bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 500 °C und verschiedenen Partikelgrößen des Einsatzstoffes im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Partikelgröße in mm	**< 2 mm**	**0…1,25**	**1,25…2**	**2…3,15**	**3,15…5**
Temperatur in °C	506	503	502	502	504
Aufheizrate in K/min	73	72	75	73	76
Koks			in Ma.-% (wf)		
A	1,3	1,4	1,3	1,4	1,3
FB	23,9	22,5	22,7	22,9	22,3
Cfix	74,8	76,1	75,9	75,7	76,3
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
C	82,1	82,7	82,6	83,0	83,4
H	3,5	3,4	3,4	3,4	3,4
N	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
O+SC	12,9	12,4	12,5	12,0	11,6
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Pyrolysegas			in Ma.-% (wf)		
C	36,0	35,2	35,4	35,3	35,3
H	1,7	1,5	1,6	1,4	1,5
N	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
O+SC	62,3	63,3	62,9	63,3	63,2
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Kondensat, gesamt			in Ma.-% (wf)		
A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C	40,9	41,6	41,0	41,4	41,0
H	8,2	8,3	8,3	8,1	8,1
N	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
O+SC	50,6	49,8	50,3	50,2	50,6
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Teer/Öl			in Ma.-% (wf)		
A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C	59,5	59,2	57,1	59,4	60,9
H	6,8	7,1	7,2	6,7	6,5
N	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5
O+SC	33,3	33,3	35,3	33,4	32,1
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Zersetzungswasser			in Ma.-% (wf)		
H	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2
O	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang H - 3: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff enthaltenen Elemente auf die Produkte bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 500 °C und verschiedenen Partikelgrößen des Einsatzstoffes im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Partikelgröße in mm	**< 2 mm**	**0…1,25**	**1,25…2**	**2…3,15**	**3,15…5**
Temperatur in °C	506	503	502	502	504
Aufheizrate in K/min	73	72	75	73	76
C-Verteilung			in %		
Koks	41,0	39,8	40,9	39,8	40,4
Kondensat, gesamt	49,3	50,1	48,9	51,0	50,3
Zersetzungswasser	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Teer/Öl	49,3	50,1	48,9	51,0	50,3
Gas	9,7	10,1	10,2	9,2	9,2
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
H-Verteilung			in %		
Koks	14,6	13,5	13,9	13,6	13,8
Kondensat, gesamt	81,7	82,9	82,2	83,2	82,9
Zersetzungswasser	34,9	33,4	31,6	36,0	39,2
Teer/Öl	46,8	49,5	50,6	47,2	43,7
Gas	3,8	3,6	3,8	3,1	3,3
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
N-Verteilung			in %		
Koks	19,5	19,7	19,1	19,5	18,6
Kondensat, gesamt	80,5	80,3	80,9	80,5	81,4
Zersetzungswasser	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Teer/Öl	80,5	80,3	80,9	80,5	81,4
Gas	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
O(+SC)-Verteilung			in %		
Koks	7,6	7,1	7,4	6,8	6,7
Kondensat, gesamt	72,4	71,3	71,2	73,5	73,7
Zersetzungswasser	39,7	37,9	35,5	40,0	43,1
Teer/Öl	32,7	33,4	35,7	33,5	30,7
Gas	19,9	21,6	21,5	19,6	19,6
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang H - 4: Energieinhalte der Produkte und „Reaktionsenthalpie“ bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 500 °C und verschiedenen Partikelgrößen des Einsatzstoffes im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Partikelgröße in mm	**< 2 mm**	**0…1,25**	**1,25…2**	**2…3,15**	**3,15…5**
Temperatur in °C	506	503	502	502	504
Aufheizrate in K/min	73	72	75	73	76
Koks			in kJ/kg (wf)		
Brennwert	31.079	31.538	31.350	31.417	31.530
Heizwert	30.310	30.798	30.609	30.668	30.782
Pyrolysegas			in kJ/kg (wf)		
Brennwert	7.198	6.557	6.793	6.528	6.627
Heizwert	6.953	6.341	6.561	6.321	6.408
Kondensat, gesamt			in kJ/kg (wf)		
Brennwert	19.166	18.569	17.863	18.132	18.325
Heizwert	17.246	16.637	16.079	16.233	16.355
Teer/Öl			in kJ/kg (wf)		
Brennwert	26.769	25.430	24.039	25.335	26.658
Heizwert	25.086	23.716	22.519	23.687	24.936
Zersetzungswasser			in kJ/kg (wf)		
Brennwert	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442
Heizwert	0	0	0	0	0
$\Delta_R H_{Chem.}$ (P-BM)			in kJ/kg (wf)		
Brennwert	835	263	-76	108	309
Heizwert	769	205	-38	46	205
Koks			in kJ/kg (waf)		
Brennwert	31.489	31.971	31.767	31.850	31.960
Heizwert	30.711	31.221	31.017	31.091	31.201
$\Delta_R H_{Chem.}$ (P-BM)			in kJ/kg (waf)		
Brennwert	838	264	-76	108	310
Heizwert	771	206	-38	46	205

Tab Anhang H - 5: Prozentuale Verteilung der chemisch gebundenen Energie bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 500 °C und verschiedenen Partikelgrößen des Einsatzstoffes im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Partikelgröße in mm	**< 2 mm**	**0…1,25**	**1,25…2**	**2…3,15**	**3,15…5**
Temperatur in °C	506	503	502	502	504
Aufheizrate in K/min	73	72	75	73	76
Koks			in % (wf)		
Brennwert	39,9	39,0	39,9	38,7	39,3
Heizwert	41,7	40,8	41,8	40,5	41,1
Pyrolysegas			in % (wf)		
Brennwert	5,0	4,9	5,0	4,4	4,4
Heizwert	5,2	5,0	5,2	4,6	4,6
Kondensat, gesamt			in % (wf)		
Brennwert	59,3	57,5	54,7	57,5	57,9
Heizwert	57,3	55,3	52,8	55,2	55,4
Teer/Öl			in % (wf)		
Brennwert	57,0	55,3	52,5	55,1	55,2
Heizwert	57,3	55,3	52,8	55,2	55,4
Zersetzungswasser			in % (wf)		
Brennwert	2,4	2,3	2,1	2,4	2,7
Heizwert	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
$\Delta_R H_{Chem}$ (P-BM)			in % (wf)		
Brennwert	4,2	1,3	-0,4	0,5	1,6
Heizwert	4,2	1,1	-0,2	0,2	1,1

Tab Anhang H - 6: Gaszusammensetzung, Ausbeuten der Gaskomponenten und Gasdichte bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 500 °C und verschiedenen Partikelgrößen des Einsatzstoffes im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Partikelgröße in mm	**< 2 mm**	**0…1,25**	**1,25…2**	**2…3,15**	**3,15…5**
Temperatur in °C	506	503	502	502	504
Aufheizrate in K/min	73	72	75	73	76
Gaszusammensetzung			in Vol.-%		
H2	1,62	2,38	2,15	1,94	2,00
Methan	10,97	9,53	10,30	9,43	10,05
CO	41,66	39,19	38,55	40,34	39,37
CO2	44,24	47,44	47,35	46,96	47,20
Ethin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H2S	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
COS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Propin	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Ethan	0,79	0,33	0,34	0,30	0,31
Ethen	0,41	0,74	0,79	0,65	0,73
Propan	0,14	0,16	0,19	0,16	0,14
Propen	0,14	0,23	0,29	0,21	0,18
i-Butan	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
N-Butan	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01
Summe	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Gasausbeute			in l i.N./kg (wf)		
H2	1,50	2,28	2,06	1,69	1,74
Methan	9,95	9,15	9,87	8,21	8,74
CO	37,87	37,62	36,96	35,08	34,25
CO2	40,43	45,55	45,40	40,84	41,06
Ethin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H2S	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
COS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Propin	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Ethan	0,72	0,32	0,33	0,26	0,27
Ethen	0,37	0,71	0,76	0,56	0,63
Propan	0,13	0,15	0,19	0,14	0,12
Propen	0,14	0,22	0,28	0,19	0,16
i-Butan	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
N-Butan	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01
Summe	91,15	96,01	95,88	86,98	86,99
Gasdichte in kJ/m^3 i.N.	1,50	1,52	1,52	1,52	1,52

Anhang I Ergebnisse zur Pyrolyse von Biomassemischungen

Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) in Mischung mit Grünschnittroggensilage (2474) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung)

Tab Anhang I - 1: Über die Mischungsregel aus den Werten der Ausgangsstoffe berechnete Zusammensetzungen und Energieinhalte für Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) in Mischung mit Grünschnittroggensilage (2474)

Zumischrate in Ma.-%	**0**	**25**	**50**	**75**	**100**
Temperatur in °C	506	504	501	501	505
Aufheizrate in K/min	73	70	72	71	70
Immediatanalyse			in Ma.-% (wf)		
A	0,3	1,3	2,2	3,2	4,2
FB	85,7	84,5	83,3	82,1	80,9
Cfix	14,0	14,2	14,5	14,7	14,9
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Elementaranalyse			in Ma.-% (wf)		
C	50,6	49,6	48,4	47,1	46,3
H	6,1	6,1	5,9	5,9	6,1
N	0,2	0,4	0,9	1,2	1,1
O+SC	42,7	42,6	42,6	42,6	42,3
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Energieinhalt			in kJ/kg (wf)		
Brennwert	19.711	19.422	19.134	18.846	18.559
Heizwert	18.378	18.089	17.800	17.512	17.225

Tab Anhang I - 2: Einfluss der Zumischrate an Grünschnittroggensilage (2474) auf die Produktverteilung bei der Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung)

Zumischrate in Ma.-%	**0**	**25**	**50**	**75**	**100**
Temperatur in °C	504	506	526	505	502
Aufheizrate in K/min	76	78	82	80	96
Ausbeuten	experimentell bestimmt (Exp) in Ma.-% (wf)				
Koks	31,8	32,4	31,4	33,1	34,2
Kondensat	52,3	50,1	51,1	51,1	50,7
Teer/Öl	33,9	30,5	31,5	31,7	32,4
Zersetzungswasser	18,4	19,6	19,7	19,5	18,3
Gas	16,0	17,5	17,4	15,7	15,0
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Ausbeuten	nach Mischungsregel (MR) in Ma.-% (wf)				
Koks	31,8	32,4	33,0	33,6	34,2
Kondensat	52,3	51,9	51,5	51,1	50,7
Teer/Öl	33,9	33,5	33,1	32,8	32,4
Zersetzungswasser	18,4	18,4	18,4	18,3	18,3
Gas	16,0	15,7	15,5	15,3	15,0
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Differenz (Exp-MR)			in %		
Koks	-	0,1	-4,8	-1,4	-
Kondensat	-	-3,5	-0,7	0,1	-
Teer/Öl	-	-9,1	-5,1	-3,3	-
Zersetzungswasser	-	6,5	7,2	6,0	-
Gas	-	11,5	12,5	2,9	-

Tab Anhang I - 3: Einfluss der Zumischrate an Grünschnittroggensilage (2474) auf die Produktzusammensetzung bei der Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung)

Zumischrate in Ma.-%	**0**	**25**	**50**	**75**	**100**
Temperatur in °C	504	506	526	505	502
Aufheizrate in K/min	76	78	82	80	96
Koks			in Ma.-% (wf)		
A	4,6	8,7	13,3	16,6	20,0
FB	23,5	20,8	17,6	21,1	21,2
Cfix	71,9	70,5	69,1	62,3	58,9
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
C	80,4	76,0	71,9	66,0	59,8
H	3,3	3,1	2,7	3,0	3,0
N	0,4	1,0	1,5	2,0	2,4
O+SC	11,3	11,2	10,6	12,3	14,8
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Pyrolysegas			in Ma.-% (wf)		
C	34,5	35,3	35,3	33,8	33,2
H	1,4	1,7	1,8	1,1	0,8
N	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
O+SC	64,1	63,1	63,0	65,1	66,0
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Kondensat, gesamt			in Ma.-% (wf)		
A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C	38,8	37,9	38,1	38,3	39,0
H	8,7	9,1	9,2	9,1	9,3
N	0,2	0,5	0,8	1,1	1,4
O+SC	52,3	52,6	51,8	51,5	50,3
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Teer/Öl			in Ma.-% (wf)		
A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C	59,8	62,2	62,0	61,7	61,1
H	7,4	7,7	7,9	7,8	8,2
N	0,3	0,8	1,3	1,8	2,2
O+SC	32,4	29,3	28,7	28,7	28,5
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Zersetzungswasser			in Ma.-% (wf)		
H	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2
O	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang I - 4: **Mittels Mischungsregel (MR) berechnete Werte für die Produktzusammensetzung bei der Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) mit Grünschnittroggensilage (2474) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung) sowie prozentuale Abweichung von den experimentell bestimmten Werten**

Zumischrate in Ma.-%	**0**	**25**	**50**	**75**	**100**	**0**	**25**	**50**	**75**	**100**
Temperatur in °C	504	506	526	505	502	504	506	526	505	502
Aufheizrate in K/min	76	78	82	80	96	76	78	82	80	96
Koks	nach MR in Ma.-% (wf)					(Exp-MR)/MR in %				
A	4,6	8,4	12,3	16,1	20,0	-	3,4	8,2	3,2	-
FB	23,5	23,0	22,4	21,8	21,2	-	-9,4	-21,3	-3,3	-
Cfix	71,9	68,6	65,4	62,1	58,9	-	2,7	5,7	0,3	-
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	-	-	-	-	-
C	80,4	75,2	70,1	65,0	59,8	-	1,1	2,6	1,6	-
H	3,3	3,2	3,2	3,1	3,0	-	-4,0	-15,6	-1,4	-
N	0,4	0,9	1,4	1,9	2,4	-	8,3	7,7	4,9	-
O+SC	11,3	12,2	13,1	14,0	14,8	-	-8,4	-18,8	-11,5	-
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	-	-	-	-	-
Pyrolysegas	nach MR in Ma.-% (wf)					(Exp-MR)/MR in %				
C	34,5	34,2	33,9	33,5	33,2	-	3,2	4,1	0,7	-
H	1,4	1,2	1,1	0,9	0,8	-	34,5	63,8	23,0	-
N	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-	-	-	-
O+SC	64,1	64,6	65,1	65,5	66,0	-	-2,4	-3,2	-0,7	-
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	-	-	-	-	-
Kondensat, gesamt	nach MR in Ma.-% (wf)					(Exp-MR)/MR in %				
A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-	-	-	-
C	38,8	38,8	38,9	39,0	39,0	-	-2,5	-2,0	-1,8	-
H	8,7	8,9	9,0	9,1	9,3	-	2,4	2,1	-0,3	-
N	0,2	0,5	0,8	1,1	1,4	-	-1,7	1,3	-2,0	-
O+SC	52,3	51,8	51,3	50,8	50,3	-	1,5	1,1	1,5	-
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	-	-	-	-	-
Teer/Öl	nach MR in Ma.-% (wf)					(Exp-MR)/MR in %				
A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-	-	-	-
C	59,8	60,2	60,5	60,8	61,1	-	3,4	2,5	1,6	-
H	7,4	7,6	7,8	8,0	8,2	-	1,6	1,9	-1,9	-
N	0,3	0,8	1,3	1,7	2,2	-	3,6	5,3	1,1	-
O+SC	32,4	31,4	30,5	29,5	28,5	-	-7,0	-5,7	-2,8	-
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	-	-	-	-	-

Tab Anhang I - 5: Einfluss der Zumischrate an Grünschnittroggensilage (2474) auf die Verteilung der im Einsatzstoff enthaltenen Elemente auf die Produkte bei der Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung)

Zumischrate in Ma.-%	**0**	**25**	**50**	**75**	**100**
Temperatur in °C	504	506	526	505	502
Aufheizrate in K/min	76	78	82	80	96
C-Verteilung			in %		
Koks	49,7	49,5	46,9	46,8	45,3
Kondensat, gesamt	39,5	38,1	40,4	41,9	43,7
Zersetzungswasser	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Teer/Öl	39,5	38,1	40,4	41,9	43,7
Gas	10,7	12,4	12,7	11,4	11,0
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
H-Verteilung			in %		
Koks	18,0	17,2	14,3	17,3	17,7
Kondensat, gesamt	78,2	77,8	80,4	79,7	80,4
Zersetzungswasser	35,3	37,5	37,7	37,2	35,0
Teer/Öl	43,0	40,3	42,7	42,5	45,4
Gas	3,8	5,0	5,3	3,0	2,0
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
N-Verteilung			in %		
Koks	54,3	55,7	52,8	54,0	53,1
Kondensat, gesamt	45,7	44,3	47,2	46,0	46,9
Zersetzungswasser	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Teer/Öl	45,7	44,3	47,2	46,0	46,9
Gas	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
O(+SC)-Verteilung			in %		
Koks	8,7	8,8	8,2	10,1	12,5
Kondensat, gesamt	66,4	64,2	64,9	64,8	63,0
Zersetzungswasser	39,7	42,4	42,8	42,5	40,2
Teer/Öl	26,7	21,8	22,1	22,3	22,8
Gas	24,8	27,0	26,9	25,1	24,5
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang I - 6: Einfluss der Zumischrate an Grünschnittroggensilage (2474) auf die Energieinhalte der Produkte bei der Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung)

Zumischrate in Ma.-%	**0**	**25**	**50**	**75**	**100**
Temperatur in °C	504	506	526	505	502
Aufheizrate in K/min	76	78	82	80	96
Koks			in kJ/kg (wf)		
Brennwert	30.177	28.379	26.898	24.928	23.065
Heizwert	29.456	27.701	26.316	24.265	22.405
Pyrolysegas			in kJ/kg (wf)		
Brennwert	5.969	6.668	6.749	5.223	4.534
Heizwert	5.775	6.437	6.505	5.072	4.431
Kondensat, gesamt			in kJ/kg (wf)		
Brennwert	17.644	17.598	17.790	17.708	17.997
Heizwert	15.763	15.630	15.765	15.755	16.048
Teer/Öl			in kJ/kg (wf)		
Brennwert	25.902	27.339	27.391	27.076	26.793
Heizwert	24.326	25.675	25.626	25.423	25.123
Zersetzungswasser			in kJ/kg (wf)		
Brennwert	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442
Heizwert	0	0	0	0	0
$\Delta_R H_{Chem}$ (Produkte-Edukte)			in kJ/kg (wf)		
Brennwert	-393	-519	-508	-643	-627
Heizwert	-363	-490	-494	-610	-580

Tab Anhang I - 7: Mittels Mischungsregel (MR) berechnete Werte für die Energieinhalte der Produkte bei der Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) mit Grünschnittroggensilage (2474) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung) sowie prozentuale Abweichung von den experimentell bestimmten Werten

Zumischrate in Ma.-%	**0**	**25**	**50**	**75**	**100**	**0**	**25**	**50**	**75**	**100**
Temperatur in °C	504	506	526	505	502	504	506	526	505	502
Aufheizrate in K/min	76	78	82	80	96	76	78	82	80	96
Koks	nach MR in kJ/kg (wf)					(Exp-MR)/MR in %				
Brennwert	30.177	28.399	26.621	24.843	23.065	-	-0,1	1,0	0,3	-
Heizwert	29.456	27.693	25.931	24.168	22.405	-	0,0	1,5	0,4	-
Pyrolysegas	nach MR in kJ/kg (wf)					(Exp-MR)/MR in %				
Brennwert	5.969	5.610	5.251	4.893	4.534	-	18,9	28,5	6,7	-
Heizwert	5.775	5.439	5.103	4.767	4.431	-	18,4	27,5	6,4	-
Kondensat, gesamt	nach MR in kJ/kg (wf)					(Exp-MR)/MR in %				
Brennwert	17.644	17.735	17.824	17.912	17.997	-	-0,8	-0,2	-1,1	-
Heizwert	15.763	15.837	15.909	15.980	16.048	-	-1,3	-0,9	-1,4	-
Teer/Öl	nach MR in kJ/kg (wf)					(Exp-MR)/MR in %				
Brennwert	25.902	26.125	26.348	26.571	26.793	-	4,6	4,0	1,9	-
Heizwert	24.326	24.526	24.725	24.924	25.123	-	4,7	3,6	2,0	-
Zersetzungswasser	nach MR in kJ/kg (wf)					(Exp-MR)/MR in %				
Brennwert	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442	-	0	0	0	-
Heizwert	0	0	0	0	0	-	0	0	0	-
$\Delta_R H_{Chem}$ (P-BM)	nach MR in kJ/kg (wf)					(Exp-MR)/MR in %				
Brennwert	-393	-411	-456	-528	-627	-	26,1	11,2	21,8	-
Heizwert	-363	-378	-418	-486	-580	-	29,9	18,1	25,5	-

Tab Anhang I - 8: Einfluss der Zumischrate an Grünschnittroggensilage (2474) auf die Verteilung der chemisch gebundenen Energie bei der Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung)

Zumischrate in Ma.-%	**0**	**25**	**50**	**75**	**100**
Temperatur in °C	504	506	526	505	502
Aufheizrate in K/min	76	78	82	80	96
Koks			in % (wf)		
Brennwert	47,5	46,7	43,9	44,0	43,1
Heizwert	49,5	48,7	46,0	45,9	45,0
Pyrolysegas			in % (wf)		
Brennwert	4,7	5,9	6,1	4,4	3,7
Heizwert	4,9	6,1	6,3	4,6	3,9
Kondensat, gesamt			in % (wf)		
Brennwert	45,8	44,7	47,3	48,2	49,8
Heizwert	43,7	42,5	44,9	46,0	47,7
Teer/Öl			in % (wf)		
Brennwert	43,6	42,3	44,8	45,7	47,3
Heizwert	43,7	42,5	44,9	46,0	47,7
Zersetzungswasser			in % (wf)		
Brennwert	2,2	2,4	2,5	2,5	2,4
Heizwert	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
$\Delta_R H_{Chem}$ (Produkte-Edukte)			in % (wf)		
Brennwert	-2,0	-2,6	-2,6	-3,4	-3,4
Heizwert	-1,9	-2,7	-2,8	-3,5	-3,4

Tab Anhang I - 9: Einfluss der Zumischrate an Grünschnittroggensilage (2474) auf die Gaszusammensetzung, die Ausbeuten der Gaskomponenten und die Gasdichte bei der Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung)

Zumischrate in Ma.-%	**0**	**25**	**50**	**75**	**100**
Temperatur in °C	504	506	526	505	502
Aufheizrate in K/min	76	78	82	80	96
Gaszusammensetzung			in Vol.-%		
H2	1,88	1,52	1,91	1,31	0,75
Methan	8,73	8,83	8,94	4,88	4,33
CO	36,06	34,67	32,37	31,96	35,88
CO2	51,75	51,49	52,78	58,33	57,56
Ethin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H2S	0,00	0,01	0,03	0,04	0,04
COS	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01
Propin	0,00	0,13	0,22	0,23	0,00
Ethan	0,75	1,67	1,94	1,68	0,82
Ethen	0,33	1,08	1,13	1,03	0,20
Propan	0,19	0,25	0,29	0,25	0,22
Propen	0,30	0,32	0,33	0,25	0,19
i-Butan	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01
N-Butan	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01
Summe	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Gasausbeute			in l i.N./kg (wf)		
H2	1,92	1,71	2,12	1,25	0,69
Methan	8,99	9,88	9,92	4,67	3,98
CO	36,80	38,81	35,90	30,62	32,94
CO2	52,80	57,64	58,53	55,87	52,73
Ethin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H2S	0,00	0,01	0,03	0,04	0,03
COS	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01
Propin	0,00	0,15	0,25	0,22	0,00
Ethan	0,78	1,87	2,15	1,61	0,75
Ethen	0,34	1,20	1,26	0,99	0,18
Propan	0,19	0,27	0,32	0,24	0,20
Propen	0,31	0,36	0,37	0,24	0,18
i-Butan	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01
N-Butan	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01
Summe	102,14	111,93	110,89	95,78	91,70
Gasdichte in kJ/m^3 i.N.	1,56	1,57	1,57	1,64	1,64

Tab Anhang I - 10: Mittels Mischungsregel (MR) berechnete Werte für die Gaszusammensetzung, die Ausbeuten der Gaskomponenten und die Gasdichte bei der Pyrolyse von Walsrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) mit Grünschnittroggensilage (2474) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung) sowie prozentuale Abweichung von den experimentell bestimmten Werten

Zumischrate in Ma.-%	**0**	**25**	**50**	**75**	**100**	**0**	**25**	**50**	**75**	**100**
Temperatur in °C	504	506	526	505	502	504	506	526	505	502
Aufheizrate in K/min	76	78	82	80	96	76	78	82	80	96
Gaszusammensetzung	nach MR in Vol.-%					(Exp-MR)/MR in %				
H2	1,88	1,60	1,32	1,03	0,75	-	-4,6	45,1	26,6	-
Methan	8,73	7,63	6,53	5,43	4,33	-	15,7	37,0	-10,2	-
CO	36,06	36,01	35,97	35,92	35,88	-	-3,7	-10,0	-11,0	-
CO2	51,75	53,21	54,66	56,11	57,56	-	-3,2	-3,4	4,0	-
Ethan	0,75	0,77	0,78	0,80	0,82	-	118,0	147,7	109,5	-
Ethen	0,33	0,30	0,26	0,23	0,20	-	260,2	328,6	346,9	-
Propan	0,19	0,19	0,20	0,21	0,22	-	27,4	45,7	22,0	-
Propen	0,30	0,27	0,25	0,22	0,19	-	17,0	36,0	16,4	-
Gasausbeute	nach MR in l i.N./kg (wf)					(Exp-MR)/MR in %				
H2	1,92	1,61	1,30	1,00	0,69	-	5,9	62,1	25,5	-
Methan	8,99	7,74	6,49	5,23	3,98	-	27,7	52,9	-10,8	-
CO	36,80	35,83	34,87	33,91	32,94	-	8,3	3,0	-9,7	-
CO2	52,80	52,79	52,77	52,75	52,73	-	9,2	10,9	5,9	-
Ethan	0,78	0,77	0,76	0,76	0,75	-	143,7	182,5	112,5	-
Ethen	0,34	0,30	0,26	0,22	0,18	-	299,1	381,2	346,7	-
Propan	0,19	0,19	0,19	0,20	0,20	-	42,6	66,5	23,9	-
Propen	0,31	0,28	0,24	0,21	0,18	-	29,4	52,6	16,5	-
Gasausbeute, gesamt	102,14	99,53	96,92	94,31	91,70	-	12,5	14,4	1,6	-

Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) in Mischung mit Weizenstroh (2275) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung)

Tab Anhang I - 11: Über die Mischungsregel aus den Werten der Ausgangsstoffe berechnete Zusammensetzungen und Energieinhalte für Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) in Mischung mit Weizenstroh (2275)

Zumischrate in Ma.-%	**0**	**25**	**50**	**75**	**100**
Temperatur in °C	504	511	499	515	508
Aufheizrate in K/min	76	79	87	78	80
Immediatanalyse			in Ma.-% (wf)		
A	1,4	2,8	4,2	5,5	6,8
FB	78,5	77,7	76,9	76,0	75,2
Cfix	20,0	19,5	19,0	18,5	18,0
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Elementaranalyse			in Ma.-% (wf)		
C	51,3	49,8	48,3	46,8	45,3
H	5,8	5,8	5,8	5,9	5,9
N	0,2	0,6	0,9	1,2	1,5
O+SC	41,2	41,0	40,8	40,7	40,5
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Energieinhalt			in kJ/kg (wf)		
Brennwert	20.154	19.692	19.235	18.782	18.334
Heizwert	18.881	18.418	17.960	17.506	17.057

Tab Anhang I - 12: Einfluss der Zumischrate an Weizenstroh (2275) auf die Produktverteilung bei der Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung)

Zumischrate in Ma.-%	**0**	**25**	**50**	**75**	**100**
Temperatur in °C	504	511	499	515	508
Aufheizrate in K/min	76	79	87	78	80
Ausbeuten			experimentell bestimmt (Exp) in Ma.-% (wf)		
Koks	31,8	30,9	32,6	32,5	32,4
Kondensat	52,3	51,4	48,2	47,7	47,3
Teer/Öl	33,9	32,6	29,4	28,0	27,3
Zersetzungswasser	18,4	18,8	18,8	19,7	20,0
Gas	16,0	17,8	19,3	19,9	20,2
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Ausbeuten			nach Mischungsregel (MR) in Ma.-% (wf)		
Koks	31,8	31,9	32,1	32,3	32,4
Kondensat	52,3	51,1	49,8	48,6	47,3
Teer/Öl	33,9	32,2	30,6	28,9	27,3
Zersetzungswasser	18,4	18,8	19,2	19,6	20,0
Gas	16,0	17,0	18,1	19,2	20,2
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Differenz (Exp-MR)			in %		
Koks	-	-3,3	1,4	0,7	-
Kondensat	-	0,6	-3,3	-1,9	-
Teer/Öl	-	1,0	-3,8	-3,3	-
Zersetzungswasser	-	-0,1	-2,4	0,3	-
Gas	-	4,4	6,5	3,6	-

Tab Anhang I - 13: Einfluss der Zumischrate an Weizenstroh (2275) auf die Produktzusammensetzung bei der Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung)

Zumischrate in Ma.-%	**0**	**25**	**50**	**75**	**100**
Temperatur in °C	504	511	499	515	508
Aufheizrate in K/min	76	79	87	78	80
Koks			in Ma.-% (wf)		
A	4,6	10,1	14,7	19,9	25,1
FB	23,5	21,2	21,9	18,8	19,8
Cfix	71,9	68,7	63,4	61,3	55,0
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
C	80,4	76,6	72,1	68,8	66,1
H	3,3	3,0	3,0	2,6	2,7
N	0,4	0,5	0,5	0,6	0,7
O+SC	11,3	9,8	9,6	8,0	5,4
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Pyrolysegas			in Ma.-% (wf)		
C	34,5	35,2	34,7	34,8	33,4
H	1,4	1,6	1,4	1,5	1,0
N	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
O+SC	64,1	63,2	63,9	63,7	65,6
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Kondensat, gesamt			in Ma.-% (wf)		
A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C	38,8	38,9	38,0	37,2	36,7
H	8,7	8,9	9,3	9,4	9,5
N	0,2	0,4	0,5	0,7	0,8
O+SC	52,3	51,9	52,2	52,7	52,9
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Teer/Öl			in Ma.-% (wf)		
A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C	59,8	61,3	62,2	63,4	63,7
H	7,4	7,5	8,1	8,1	8,2
N	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5
O+SC	32,4	30,6	28,9	27,2	26,6
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Zersetzungswasser			in Ma.-% (wf)		
H	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2
O	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang I - 14: Mittels Mischungsregel (MR) berechnete Werte für die Produktzusammensetzung bei der Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) mit Weizenstroh (2275) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung) sowie prozentuale Abweichung von den experimentell bestimmten Werten

Zumischrate in Ma.-%	**0**	**25**	**50**	**75**	**100**	**0**	**25**	**50**	**75**	**100**
Temperatur in °C	504	511	499	515	508	504	511	499	515	508
Aufheizrate in K/min	76	79	87	78	80	76	79	87	78	80
Koks	nach MR in Ma.-% (wf)					(Exp-MR)/MR in %				
A	4,6	9,7	14,8	20,0	25,1	-	4,2	-0,7	-0,3	-
FB	23,5	22,6	21,7	20,7	19,8	-	-6,4	0,9	-9,6	-
Cfix	71,9	67,7	63,5	59,3	55,0	-	1,5	-0,1	3,5	-
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	-	-	-	-	-
C	80,4	76,8	73,2	69,6	66,1	-	-0,2	-1,5	-1,1	-
H	3,3	3,1	3,0	2,8	2,7	-	-3,8	-0,6	-6,8	-
N	0,4	0,5	0,6	0,6	0,7	-	-5,0	-4,9	-6,2	-
O+SC	11,3	9,9	8,4	6,9	5,4	-	-0,8	15,2	15,7	-
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	-	-	-	-	-
Pyrolysegas	nach MR in Ma.-% (wf)					(Exp-MR)/MR in %				
C	34,5	34,2	34,0	33,7	33,4	-	2,9	2,2	3,3	-
H	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0	-	22,1	12,7	34,9	-
N	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-	-	-	-
O+SC	64,1	64,5	64,8	65,2	65,6	-	-2,0	-1,4	-2,3	-
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	-	-	-	-	-
Kondensat, gesamt	nach MR in Ma.-% (wf)					(Exp-MR)/MR in %				
A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-	-	-	-
C	38,8	38,3	37,8	37,2	36,7	-	1,6	0,5	-0,1	-
H	8,7	8,9	9,1	9,3	9,5	-	-0,6	1,9	1,0	-
N	0,2	0,4	0,5	0,7	0,8	-	3,2	2,9	3,7	-
O+SC	52,3	52,4	52,6	52,8	52,9	-	-1,1	-0,7	-0,2	-
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	-	-	-	-	-
Teer/Öl	nach MR in Ma.-% (wf)					(Exp-MR)/MR in %				
A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-	-	-	-
C	59,8	60,8	61,8	62,7	63,7	-	0,8	0,6	1,1	-
H	7,4	7,6	7,8	8,0	8,2	-	-1,1	3,2	1,2	-
N	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5	-	-1,5	-0,6	2,8	-
O+SC	32,4	31,0	29,5	28,0	26,6	-	-1,3	-2,1	-2,9	-
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	-	-	-	-	-

Tab Anhang I - 15: Einfluss der Zumischrate an Weizenstroh (2275) auf die Verteilung der im Einsatzstoff enthaltenen Elemente auf die Produkte bei der Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung)

Zumischrate in Ma.-%	**0**	**25**	**50**	**75**	**100**
Temperatur in °C	504	511	499	515	508
Aufheizrate in K/min	76	79	87	78	80
C-Verteilung			in %		
Koks	49,7	47,4	48,4	47,6	47,0
Kondensat,gesamt	39,5	40,0	37,8	37,8	38,2
Zersetzungswasser	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Teer/Öl	39,5	40,0	37,8	37,8	38,2
Gas	10,7	12,5	13,8	14,7	14,8
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
H-Verteilung			in %		
Koks	18,0	16,2	17,0	15,2	15,6
Kondensat,gesamt	78,2	78,9	78,4	79,5	80,7
Zersetzungswasser	35,3	36,4	36,8	39,1	40,3
Teer/Öl	43,0	42,5	41,6	40,4	40,4
Gas	3,8	4,9	4,6	5,3	3,7
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
N-Verteilung			in %		
Koks	54,3	42,2	39,9	36,4	36,5
Kondensat,gesamt	45,7	57,8	60,1	63,6	63,5
Zersetzungswasser	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Teer/Öl	45,7	57,8	60,1	63,6	63,5
Gas	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
O(+SC)-Verteilung			in %		
Koks	8,7	7,4	7,7	6,4	4,4
Kondensat,gesamt	66,4	65,2	61,9	62,2	62,5
Zersetzungswasser	39,7	40,8	41,0	43,4	44,4
Teer/Öl	26,7	24,3	20,9	18,9	18,1
Gas	24,8	27,5	30,3	31,4	33,1
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang I - 16: Einfluss der Zumischrate an Weizenstroh (2275) auf die Energieinhalte der Produkte bei der Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung)

Zumischrate in Ma.-%	**0**	**25**	**50**	**75**	**100**
Temperatur in °C	504	511	499	515	508
Aufheizrate in K/min	76	79	87	78	80
Koks			in kJ/kg (wf)		
Brennwert	30.177	28.526	26.814	25.437	24.690
Heizwert	29.456	27.865	26.165	24.860	24.106
Pyrolysegas			in kJ/kg (wf)		
Brennwert	5.969	6.555	5.996	6.184	4.877
Heizwert	5.775	6.334	5.810	5.978	4.740
Kondensat, gesamt			in kJ/kg (wf)		
Brennwert	17.644	18.449	17.728	17.512	17.261
Heizwert	15.763	16.471	15.752	15.489	15.209
Teer/Öl			in kJ/kg (wf)		
Brennwert	25.902	27.681	27.477	28.123	28.141
Heizwert	24.326	25.972	25.798	26.396	26.377
Zersetzungswasser			in kJ/kg (wf)		
Brennwert	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442
Heizwert	0	0	0	0	0
$\Delta_R H_{Chem}$ (Produkte-Edukte)			in kJ/kg (wf)		
Brennwert	-393	-155	-621	-657	-773
Heizwert	-363	-155	-576	-620	-747

Tab Anhang I - 17: Mittels Mischungsregel (MR) berechnete Werte für die Energieinhalte der Produkte bei der Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) mit Weizenstroh (2275) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung) sowie prozentuale Abweichung von den experimentell bestimmten Werten

Zumischrate in Ma.-%	**0**	**25**	**50**	**75**	**100**	**0**	**25**	**50**	**75**	**100**
Temperatur in °C	504	511	499	515	508	504	511	499	515	508
Aufheizrate in K/min	76	79	87	78	80	76	79	87	78	80
Koks	nach MR in kJ/kg (wf)					(Exp-MR)/MR in %				
Brennwert	30.177	28.805	27.433	26.062	24.690	-	-1,0	-2,3	-2,5	-
Heizwert	29.456	28.118	26.781	25.444	24.106	-	-0,9	-2,4	-2,3	-
Pyrolysegas	nach MR in kJ/kg (wf)					(Exp-MR)/MR in %				
Brennwert	5.969	5.696	5.423	5.150	4.877	-	13,1	9,6	16,7	-
Heizwert	5.775	5.516	5.257	4.998	4.740	-	12,9	9,5	16,4	-
Kondensat, gesamt	nach MR in kJ/kg (wf)					(Exp-MR)/MR in %				
Brennwert	17.644	17.609	17.536	17.421	17.261	-	4,8	1,1	0,5	-
Heizwert	15.763	15.685	15.568	15.411	15.209	-	5,0	1,2	0,5	-
Teer/Öl	nach MR in kJ/kg (wf)					(Exp-MR)/MR in %				
Brennwert	25.902	26.462	27.022	27.581	28.141	-	4,4	1,7	1,9	-
Heizwert	24.326	24.839	25.352	25.864	26.377	-	4,4	1,7	2,0	-
Zersetzungswasser	nach MR in kJ/kg (wf)					(Exp-MR)/MR in %				
Brennwert	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442	-	0,0	0,0	0,0	-
Heizwert	0	0	0	0	0	-	0,0	0,0	0,0	-
$\Delta_R H_{Chem}$ (P-BM)	nach MR in kJ/kg (wf)					(Exp-MR)/MR in %				
Brennwert	-393	-446	-526	-635	-773	-	-188,1	15,31	3,22	-
Heizwert	-363	-419	-502	-611	-747	-	-170,7	12,91	1,41	-

Tab Anhang I - 18: Einfluss der Zumischrate an Weizenstroh (2275) auf die Verteilung der chemisch gebundenen Energie bei der Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung)

Zumischrate in Ma.-%	**0**	**25**	**50**	**75**	**100**
Temperatur in °C	504	511	499	515	508
Aufheizrate in K/min	76	79	87	78	80
Koks			in % (wf)		
Brennwert	47,5	44,9	45,8	44,7	44,6
Heizwert	49,5	46,9	47,8	46,8	46,8
Pyrolysegas			in % (wf)		
Brennwert	4,7	5,9	6,1	6,6	5,5
Heizwert	4,9	6,1	6,3	6,9	5,7
Kondensat, gesamt			in % (wf)		
Brennwert	45,8	48,3	44,9	45,1	45,5
Heizwert	43,7	46,1	42,6	42,8	43,0
Teer/Öl			in % (wf)		
Brennwert	43,6	46,0	42,4	42,5	42,8
Heizwert	43,7	46,1	42,6	42,8	43,0
Zersetzungswasser			in % (wf)		
Brennwert	2,2	2,3	2,4	2,6	2,7
Heizwert	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
$\Delta_R H_{Chem}$ (Produkte-Edukte)			in % (wf)		
Brennwert	-2,0	-0,8	-3,3	-3,6	-4,3
Heizwert	-1,9	-0,8	-3,2	-3,6	-4,5

Tab Anhang I - 19. Einfluss der Zumischrate an Weizenstroh (2275) auf die Gaszusammensetzung, die Ausbeuten der Gaskomponenten und die Gasdichte bei der Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung)

Zumischrate in Ma.-%	**0**	**25**	**50**	**75**	**100**
Temperatur in °C	504	511	499	515	508
Aufheizrate in K/min	76	79	87	78	80
Gaszusammensetzung			in Vol.-%		
H2	1,88	1,46	0,98	1,33	1,13
Methan	8,73	8,56	6,99	7,57	6,31
CO	36,06	35,67	35,02	33,23	31,97
CO2	51,75	51,09	53,69	54,22	58,66
Ethin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H2S	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
COS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Propin	0,00	0,07	0,12	0,12	0,09
Ethan	0,75	1,59	1,68	1,95	0,30
Ethen	0,33	1,04	1,02	1,02	1,15
Propan	0,19	0,21	0,22	0,25	0,26
Propen	0,30	0,29	0,27	0,29	0,09
i-Butan	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
N-Butan	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Summe	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Gasausbeute			in l i.N./kg (wf)		
H2	1,92	1,68	1,18	1,65	1,40
Methan	8,99	9,79	8,42	9,42	7,82
CO	36,80	40,47	42,21	41,35	39,57
CO2	52,80	57,95	64,71	67,46	72,64
Ethin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H2S	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
COS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Propin	0,00	0,08	0,14	0,15	0,11
Ethan	0,78	1,82	2,03	2,43	0,37
Ethen	0,34	1,19	1,23	1,26	1,43
Propan	0,19	0,24	0,26	0,31	0,32
Propen	0,31	0,33	0,32	0,36	0,11
i-Butan	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01
N-Butan	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Summe	102,14	113,59	120,52	124,42	123,82
Gasdichte in kJ/m^3 i.N.	1,56	1,57	1,60	1,60	1,63

Tab Anhang I - 20. Mittels Mischungsregel (MR) berechnete Werte für die Gaszusammensetzung, die Ausbeuten der Gaskomponenten und die Gasdichte bei der Pyrolyse von Walsrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) mit Weizenstroh (2275) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung) sowie prozentuale Abweichung von den experimentell bestimmten Werten

Zumischrate in Ma.-%	**0**	**25**	**50**	**75**	**100**	**0**	**25**	**50**	**75**	**100**
Temperatur in °C	504	511	499	515	508	504	511	499	515	508
Aufheizrate in K/min	76	79	87	78	80	76	79	87	78	80
Gaszusammensetzung	nach MR in Vol.-%					(Exp-MR)/MR in %				
H2	1,88	1,69	1,51	1,32	1,13	-	-16,3	-54,1	0,7	-
Methan	8,73	8,13	7,52	6,92	6,31	-	5,0	-7,7	8,6	-
CO	36,06	35,04	34,01	32,99	31,97	-	1,8	2,9	0,7	-
CO2	51,75	53,48	55,21	56,94	58,66	-	-4,7	-2,8	-5,0	-
Ethan	0,75	0,64	0,52	0,41	0,30	-	59,9	68,8	79,0	-
Ethen	0,33	0,54	0,74	0,95	1,15	-	48,4	27,3	6,7	-
Propan	0,19	0,20	0,22	0,24	0,26	-	3,5	-2,0	4,5	-
Propen	0,30	0,25	0,19	0,14	0,09	-	14,7	27,8	51,8	-
Gasausbeute	nach MR in l i.N./kg (wf)					(Exp-MR)/MR in %				
H2	1,92	1,79	1,66	1,53	1,40	-	-5,7	-27,0	7,2	-
Methan	8,99	8,70	8,41	8,11	7,82	-	12,2	0,2	15,6	-
CO	36,80	37,49	38,18	38,88	39,57	-	8,1	10,7	6,5	-
CO2	52,80	57,76	62,72	67,68	72,64	-	0,4	3,4	-0,4	-
Ethan	0,78	0,67	0,57	0,47	0,37	-	147,7	216,0	343,4	-
Ethen	0,34	0,61	0,89	1,16	1,43	-	168,1	56,5	12,0	-
Propan	0,19	0,22	0,26	0,29	0,32	-	10,1	2,5	9,3	-
Propen	0,31	0,26	0,21	0,16	0,11	-	24,0	42,8	94,7	-
Gasausbeute, gesamt	102,14	107,56	112,98	118,40	123,82	-	5,9	7,0	5,3	-

Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) in Mischung mit Maissilage (2475) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung)

Tab Anhang I - 21. Über die Mischungsregel aus den Werten der Ausgangsstoffe berechnete Zusammensetzungen und Energieinhalte für Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) in Mischung mit Maissilage (2475)

Zumischrate in Ma.-%	**0**	**25**	**50**	**75**	**100**
Temperatur in °C	504	506	526	505	502
Aufheizrate in K/min	76	78	82	80	96
Immediatanalyse			in Ma.-% (wf)		
A	0,3	1,3	2,2	3,2	4,2
FB	85,7	84,5	83,3	82,1	80,9
Cfix	14,0	14,2	14,5	14,7	14,9
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Elementaranalyse			in Ma.-% (wf)		
C	50,7	49,6	48,4	47,1	46,3
H	6,1	6,1	5,9	5,9	6,1
N	0,2	0,4	0,9	1,2	1,1
O+SC	42,7	42,6	42,6	42,6	42,3
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Energieinhalt			in kJ/kg (wf)		
Brennwert	19.711	19.422	19.134	18.846	18.559
Heizwert	18.378	18.089	17.800	17.512	17.225

Tab Anhang I - 22: Einfluss der Zumischrate an Maissilage (2475) auf die Produktverteilung bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung)

Zumischrate in Ma.-%	**0**	**25**	**50**	**75**	**100**
Temperatur in °C	506	504	501	501	505
Aufheizrate in K/min	73	70	72	71	70
Ausbeuten			experimentell bestimmt (Exp) in Ma.-% (wf)		
Koks	25,3	25,6	26,0	27,5	27,4
Kondensat	61,0	59,7	58,3	55,7	55,8
Teer/Öl	42,2	40,6	37,8	33,5	33,2
Zersetzungswasser	18,9	19,1	20,5	22,1	22,5
Gas	13,7	14,6	15,7	16,8	16,9
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Ausbeuten			nach Mischungsregel (MR) in Ma.-% (wf)		
Koks	25,3	25,8	26,3	26,9	27,4
Kondensat	61,0	59,7	58,4	57,1	55,8
Teer/Öl	42,2	39,9	37,7	35,5	33,2
Zersetzungswasser	18,9	19,8	20,7	21,6	22,5
Gas	13,7	14,5	15,3	16,1	16,9
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Differenz (Exp-MR)			in %		
Koks	-	-0,8	-1,1	2,5	-
Kondensat	-	0,0	-0,2	-2,5	-
Teer/Öl	-	1,8	0,2	-5,4	-
Zersetzungswasser	-	-3,5	-0,8	2,3	-
Gas	-	1,3	2,6	4,8	-

Tab Anhang I - 23: Einfluss der Zumischrate an Maissilage (2475) auf die Produktzusammensetzung bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung)

Zumischrate in Ma.-%	**0**	**25**	**50**	**75**	**100**
Temperatur in °C	506	504	501	501	505
Aufheizrate in K/min	73	70	72	71	70
Koks			in Ma.-% (wf)		
A	1,3	5,0	8,6	11,6	15,2
FB	25,0	21,2	19,8	17,8	16,0
Cfix	73,7	73,8	71,6	70,6	68,8
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
C	81,2	80,5	78,4	76,7	73,4
H	3,6	3,4	3,3	3,1	2,9
N	0,2	0,8	1,2	1,6	2,0
O+SC	13,8	10,4	8,5	7,0	6,4
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Pyrolysegas			in Ma.-% (wf)		
C	36,0	34,8	34,2	34,0	33,1
H	1,7	1,2	1,1	1,1	0,9
N	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
O+SC	62,3	63,9	64,7	64,9	65,9
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Kondensat, gesamt			in Ma.-% (wf)		
A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C	41,3	39,9	38,8	36,4	37,0
H	8,2	8,5	8,3	8,7	9,3
N	0,3	0,4	1,0	1,4	0,9
O+SC	50,2	51,2	51,9	53,5	52,8
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Teer/Öl			in Ma.-% (wf)		
A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C	59,7	58,7	59,9	60,4	62,1
H	6,8	7,2	6,7	7,1	7,9
N	0,4	0,6	1,6	2,3	1,6
O+SC	33,0	33,5	31,8	30,2	28,4
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Zersetzungswasser			in Ma.-% (wf)		
H	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2
O	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang I - 24: Mittels Mischungsregel (MR) berechnete Werte für die Produktzusammensetzung bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) mit Maissilage (2475) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung) sowie prozentuale Abweichung von den experimentell bestimmten Werten

Zumischrate in Ma.-%	**0**	**25**	**50**	**75**	**100**	**0**	**25**	**50**	**75**	**100**
Temperatur in °C	506	504	501	501	505	506	504	501	501	505
Aufheizrate in K/min	73	70	72	71	70	73	70	72	71	70
Koks	nach MR in Ma.-% (wf)					(Exp-MR)/MR in %				
A	1,3	5,0	8,5	11,9	15,2	-	0,8	1,1	-2,4	-
FB	25,0	22,7	20,5	18,3	16,0	-	-6,9	-3,5	-2,7	-
Cfix	73,7	72,3	71,0	69,8	68,8	-	2,1	0,9	1,1	-
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	-	-	-	-	-
C	81,2	79,2	77,3	75,4	73,4	-	1,5	1,4	1,7	-
H	3,6	3,4	3,2	3,1	2,9	-	-0,4	1,6	2,4	-
N	0,2	0,6	1,1	1,6	2,0	-	17,2	8,7	2,0	-
O+SC	13,8	11,7	9,8	8,1	6,4	-	-11,6	-13,3	-13,8	-
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	-	-	-	-	-
Pyrolysegas	nach MR in Ma.-% (wf)					(Exp-MR)/MR in %				
C	36,0	35,3	34,6	33,9	33,1	-	-1,2	-1,0	0,4	-
H	1,7	1,5	1,3	1,1	0,9	-	-15,7	-15,2	1,4	-
N	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-	-	-	-
O+SC	62,3	63,2	64,1	65,0	65,9	-	1,1	0,8	-0,2	-
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	-	-	-	-	-
Kondensat, gesamt	nach MR in Ma.-% (wf)					(Exp-MR)/MR in %				
A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-	-	-	-
C	41,3	40,2	39,0	37,5	37,0	-	-0,7	-0,4	-2,9	-
H	8,2	8,4	8,2	8,6	9,3	-	0,8	0,6	1,5	-
N	0,3	0,5	1,0	1,4	0,9	-	-9,7	-3,4	0,1	-
O+SC	50,2	50,9	51,8	52,5	52,8	-	0,5	0,3	1,8	-
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	-	-	-	-	-
Teer/Öl	nach MR in Ma.-% (wf)					(Exp-MR)/MR in %				
A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-	-	-	-
C	59,7	60,3	60,9	61,5	62,1	-	-2,7	-1,7	-1,7	-
H	6,8	7,1	7,4	7,7	7,9	-	1,5	-8,9	-8,0	-
N	0,4	0,7	1,0	1,3	1,6	-	-14,6	54,8	82,9	-
O+SC	33,0	31,9	30,7	29,6	28,4	-	4,8	2,2	0,4	-
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	-	-	-	-	-

Tab Anhang I - 25: Einfluss der Zumischrate an Maissilage (2475) auf die Verteilung der im Einsatzstoff enthaltenen Elemente auf die Produkte bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung)

Zumischrate in Ma.-%	**0**	**25**	**50**	**75**	**100**
Temperatur in °C	506	504	501	501	505
Aufheizrate in K/min	73	70	72	71	70
C-Verteilung			in %		
Koks	40,6	41,6	42,2	44,8	43,4
Kondensat, gesamt	49,7	48,1	46,8	43,0	44,5
Zersetzungswasser	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Teer/Öl	49,7	48,1	46,8	43,0	44,5
Gas	9,7	10,3	11,1	12,1	12,1
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
H-Verteilung			in %		
Koks	14,8	14,2	14,6	14,6	12,9
Kondensat, gesamt	81,5	82,8	82,5	82,1	84,5
Zersetzungswasser	34,5	35,0	39,2	42,0	41,3
Teer/Öl	47,0	47,9	43,3	40,1	43,2
Gas	3,7	3,0	2,9	3,2	2,6
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
N-Verteilung			in %		
Koks	19,5	43,4	34,8	35,9	51,8
Kondensat, gesamt	80,5	56,6	65,2	64,1	48,2
Zersetzungswasser	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Teer/Öl	80,5	56,6	65,2	64,1	48,2
Gas	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
O(+SC)-Verteilung			in %		
Koks	8,2	6,2	5,2	4,5	4,2
Kondensat, gesamt	71,9	71,8	71,0	69,9	69,6
Zersetzungswasser	39,2	39,8	42,8	46,1	47,3
Teer/Öl	32,6	32,0	28,2	23,8	22,3
Gas	20,0	22,0	23,8	25,6	26,2
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang I - 26: Einfluss der Zumischrate an Maissilage (2475) auf die Energieinhalte der Produkte bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung)

Zumischrate in Ma.-%	**0**	**25**	**50**	**75**	**100**
Temperatur in °C	506	504	501	501	505
Aufheizrate in K/min	73	70	72	71	70
Koks			in kJ/kg (wf)		
Brennwert	30.964	30.174	29.449	28.916	27.743
Heizwert	30.186	29.435	28.734	28.232	27.114
Pyrolysegas			in kJ/kg (wf)		
Brennwert	7.182	6.025	5.489	5.363	4.688
Heizwert	6.940	5.850	5.338	5.209	4.561
Kondensat, gesamt			in kJ/kg (wf)		
Brennwert	19.459	17.746	17.426	16.616	17.650
Heizwert	17.520	15.858	15.497	14.630	15.559
Teer/Öl			in kJ/kg (wf)		
Brennwert	27.068	24.936	25.571	25.961	27.972
Heizwert	25.355	23.308	23.921	24.276	26.118
Zersetzungswasser			in kJ/kg (wf)		
Brennwert	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442
Heizwert	0	0	0	0	0
$\Delta_R H_{Chem}$ (Produkte-Edukte)			in kJ/kg (wf)		
Brennwert	983	-208	-445	-737	-330
Heizwert	903	-217	-446	-722	-357

Tab Anhang I - 27: Mittels Mischungsregel (MR) berechnete Werte für die Energieinhalte der Produkte bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) mit Maissilage (2475) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung) sowie prozentuale Abweichung von den experimentell bestimmten Werten

Zumischrate in Ma.-%	**0**	**25**	**50**	**75**	**100**	**0**	**25**	**50**	**75**	**100**
Temperatur in °C	506	504	501	501	505	506	504	501	501	505
AHG in K/min	73	70	72	71	70	73	70	72	71	70
Koks	nach MR in kJ/kg (wf)					(Exp-MR)/MR in %				
Brennwert	30.964	30.158	29.353	28.548	27.743	-	0,1	0,3	1,3	-
Heizwert	30.186	29.418	28.650	27.882	27.114	-	0,1	0,3	1,3	-
Pyrolysegas	nach MR in kJ/kg (wf)					(Exp-MR)/MR in %				
Brennwert	7.182	6.558	5.935	5.311	4.688	-	-8,1	-7,5	1,0	-
Heizwert	6.940	6.345	5.751	5.156	4.561	-	-7,8	-7,2	1,0	-
Kondensat, ges.	nach MR in kJ/kg (wf)					(Exp-MR)/MR in %				
Brennwert	19.459	19.062	18.630	18.160	17.650	-	-6,9	-6,5	-8,5	-
Heizwert	17.520	17.084	16.613	16.105	15.559	-	-7,2	-6,7	-9,2	-
Teer/Öl	nach MR in kJ/kg (wf)					(Exp-MR)/MR in %				
Brennwert	27.068	27.294	27.520	27.746	27.972	-	-8,6	-7,1	-6,4	-
Heizwert	25.355	25.546	25.736	25.927	26.118	-	-8,8	-7,1	-6,4	-
Zersetzungs-W.	nach MR in kJ/kg (wf)					(Exp-MR)/MR in %				
Brennwert	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442	-	0,0	0,0	0,0	-
Heizwert	0	0	0	0	0	-	0,0	0,0	0,0	-
$\Delta_R H_{Chem}$ (P-BM)	nach MR in kJ/kg (wf)					(Exp-MR)/MR in %				
Brennwert	983	698	384	41	-330	-	-129,8	-215,9	-1888,7	-
Heizwert	903	628	326	-2	-357	-	-134,6	-236,8	36887,7	-

Tab Anhang I - 28: Einfluss der Zumischrate an Maissilage (2475) auf die Verteilung der chemisch gebundenen Energie bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung)

Zumischrate in Ma.-%	**0**	**25**	**50**	**75**	**100**
Temperatur in °C	506	504	501	501	505
Aufheizrate in K/min	73	70	72	71	70
Koks			in % (wf)		
Brennwert	39,8	39,8	40,1	42,2	40,9
Heizwert	41,6	41,7	42,0	44,4	43,1
Pyrolysegas			in % (wf)		
Brennwert	5,0	4,5	4,5	4,8	4,3
Heizwert	5,2	4,7	4,7	5,0	4,5
Kondensat, gesamt			in % (wf)		
Brennwert	60,2	54,6	53,1	49,1	53,0
Heizwert	58,2	52,4	50,8	46,5	50,4
Teer/Öl			in % (wf)		
Brennwert	57,9	52,2	50,5	46,2	50,1
Heizwert	58,2	52,4	50,8	46,5	50,4
Zersetzungswasser			in % (wf)		
Brennwert	2,3	2,4	2,6	2,9	3,0
Heizwert	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
$\Delta_R H_{Chem}$ (Produkte-Edukte)			in % (wf)		
Brennwert	5,0	-1,1	-2,3	-3,9	-1,8
Heizwert	4,9	-1,2	-2,5	-4,1	-2,1

Tab Anhang I - 29: Einfluss der Zumischrate an Maissilage (2475) auf die Gaszusammensetzung, die Ausbeuten der Gaskomponenten und die Gasdichte bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung)

Zumischrate in Ma.-%	**0**	**25**	**50**	**75**	**100**
Temperatur in °C	506	504	501	501	505
Aufheizrate in K/min	73	70	72	71	70
Gaszusammensetzung			in Vol.-%		
H2	1,62	0,95	0,92	1,01	2,26
Methan	10,97	8,13	6,77	6,72	4,58
CO	41,67	40,08	37,80	35,43	32,84
CO2	44,24	49,37	52,80	54,89	58,33
Ethin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H2S	0,00	0,00	0,01	0,04	0,07
COS	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01
Propin	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Ethan	0,46	0,80	0,91	1,07	0,64
Ethen	0,74	0,28	0,38	0,31	0,65
Propan	0,14	0,17	0,19	0,25	0,31
Propen	0,14	0,21	0,21	0,26	0,27
i-Butan	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02
N-Butan	0,01	0,00	0,01	0,01	0,03
Summe	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Gasausbeute			in l i.N./kg (wf)		
H2	1,50	0,89	0,90	1,05	2,34
Methan	9,96	7,64	6,66	7,03	4,74
CO	37,88	37,66	37,18	37,08	33,97
CO2	40,44	46,39	51,93	57,45	60,33
Ethin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H2S	0,00	0,00	0,01	0,04	0,07
COS	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01
Propin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ethan	0,42	0,75	0,90	1,12	0,66
Ethen	0,68	0,26	0,37	0,32	0,67
Propan	0,13	0,16	0,19	0,26	0,32
Propen	0,14	0,20	0,21	0,28	0,28
i-Butan	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02
N-Butan	0,01	0,00	0,01	0,01	0,03
Summe	91,15	93,96	98,36	104,66	103,44
Gasdichte in kJ/m^3 i.N.	1,50	1,56	1,60	1,61	1,63

Tab Anhang I - 30: Mittels Mischungsregel (MR) berechnete Werte für die Gaszusammensetzung, die Ausbeuten der Gaskomponenten und die Gasdichte bei der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) mit Maissilage (2475) bei 500 °C im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung) sowie prozentuale Abweichung von den experimentell bestimmten Werten

Zumischrate in Ma.-%	**0**	**25**	**50**	**75**	**100**	**0**	**25**	**50**	**75**	**100**
Temperatur in °C	506	504	501	501	505	506	504	501	501	505
Aufheizrate in K/min	73	70	72	71	70	73	70	72	71	70
Gaszusammensetzung	nach MR in Vol.-%					(Exp-MR)/MR in %				
H2	1,62	1,78	1,94	2,10	2,26	-	-46,5	-52,6	-52,1	-
Methan	10,97	9,38	7,78	6,18	4,58	-	-13,3	-12,9	8,8	-
CO	41,67	39,46	37,25	35,05	32,84	-	1,6	1,5	1,1	-
CO2	44,24	47,76	51,28	54,81	58,33	-	3,4	2,9	0,2	-
Ethan	0,46	0,51	0,55	0,60	0,64	-	57,0	65,3	79,7	-
Ethen	0,74	0,72	0,69	0,67	0,65	-	-60,6	-45,7	-53,7	-
Propan	0,14	0,19	0,23	0,27	0,31	-	-9,4	-17,2	-7,3	-
Propen	0,14	0,17	0,20	0,23	0,27	-	22,0	3,7	12,7	-
Gasausbeute	nach MR in l i.N./kg (wf)					(Exp-MR)/MR in %				
H2	1,50	1,71	1,92	2,13	2,34	-	-47,7	-52,9	-50,6	-
Methan	9,96	8,65	7,35	6,04	4,74	-	-11,7	-9,3	16,4	-
CO	37,88	36,90	35,92	34,95	33,97	-	2,0	3,5	6,1	-
CO2	40,44	45,41	50,38	55,36	60,33	-	2,2	3,1	3,8	-
Ethan	0,42	0,48	0,54	0,60	0,66	-	55,5	65,5	86,2	-
Ethen	0,68	0,68	0,67	0,67	0,67	-	-60,8	-45,1	-51,6	-
Propan	0,13	0,18	0,23	0,28	0,32	-	-12,7	-18,7	-5,0	-
Propen	0,14	0,17	0,21	0,24	0,28	-	14,6	0,6	15,0	-
Gasausbeute, gesamt	102,14	107,56	112,98	118,40	123,82	-	-0,3	1,1	4,3	-

Anhang J Ergebnisse zur Pyrolyse von Hemicellulose, Cellulose und Lignin

Pyrolyse von Xylan (1234) und Xylan (Birkenholz, 2664) im Festbettreaktor unter Variation der Temperatur (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung)

Tab Anhang J - 1: Produktverteilung bei der Pyrolyse von Xylan (1234) und Xylan (Birkenholz, 2664) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Einsatzstoff	Xylan (1234)			Xylan, Birkenholz (2664)		
Temperatur in °C	**374**	**486**	**700**	**265**	**403**	**703**
Aufheizrate in K/min	55	87	169	49	100	163
Ausbeuten			in Ma.-% (wf)			
Koks	32,8	27,7	26,9	85,3	35,3	27,1
Kondensat	46,5	46,9	47,1	11,0	48,6	45,3
Teer/Öl	29,4	24,4	22,9	4,4	27,1	17,6
Zersetzungswasser	17,1	22,5	24,2	6,6	21,6	27,7
Gas	20,7	25,4	26,0	3,7	16,1	27,6
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Ausbeuten			in Ma.-% (waf)			
Koks	26,7	21,1	20,3	84,2	30,6	21,9
Kondensat	50,7	51,2	51,4	11,8	52,1	48,5
Teer/Öl	32,1	26,6	25,0	4,7	29,0	18,9
Zersetzungswasser	18,6	24,6	26,4	7,1	23,1	29,7
Gas	22,6	27,7	28,4	4,0	17,3	29,6
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang J - 2: Produktzusammensetzung bei der Pyrolyse von Xylan (1234) und Xylan (Birkenholz, 2664) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Einsatzstoff	Xylan (1234)			Xylan, Birkenholz (2664)		
Temperatur in °C	**374**	**486**	**700**	**265**	**403**	**703**
Aufheizrate in K/min	55	87	169	49	100	163
Koks			in Ma.-% (wf)			
A	25,4	30,1	31,0	7,9	19,1	24,8
FB	30,2	22,2	16,5	71,4	35,8	18,5
Cfix	44,4	47,7	52,5	20,7	45,1	56,7
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
C	62,9	64,2	63,4	47,3	65,8	71,5
H	4,2	2,8	1,8	5,5	4,5	2,0
N	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1
O+SC	7,4	2,9	3,7	39,3	10,6	1,6
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Pyrolysegas			in Ma.-% (wf)			
C	33,6	34,5	35,2	31,1	37,0	33,6
H	0,1	1,0	2,7	0,0	0,5	2,1
N	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
O+SC	66,2	64,6	62,1	68,9	62,4	64,2
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Kondensat, gesamt			in Ma.-% (wf)			
A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C	33,7	35,7	36,2	16,5	29,0	32,3
H	8,7	9,5	9,1	7,1	7,8	9,6
N	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0
O+SC	57,5	54,8	54,7	76,4	63,1	58,1
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Teer/Öl			in Ma.-% (wf)			
A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C	53,3	68,7	74,5	41,5	52,1	83,0
H	7,3	7,9	6,9	0,8	5,2	7,0
N	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1
O+SC	39,4	23,3	18,5	57,7	42,6	9,9
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Zersetzungswasser			in Ma.-% (wf)			
H	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2
O	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang J - 3: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff enthaltenen Elemente auf die Produkte bei der Pyrolyse von Xylan (1234) und Xylan (Birkenholz, 2664) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Einsatzstoff	Xylan (1234)			Xylan, Birkenholz (2664)		
Temperatur in °C	**374**	**486**	**700**	**265**	**403**	**703**
Aufheizrate in K/min	55	87	169	49	100	163
C-Verteilung			in %			
Koks	47,7	41,1	39,5	93,1	53,6	44,8
Kondensat, gesamt	36,2	38,7	39,4	4,2	32,6	33,7
Zersetzungswasser	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Teer/Öl	36,2	38,7	39,4	4,2	32,6	33,7
Gas	16,1	20,2	21,1	2,7	13,8	21,4
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
H-Verteilung			in %			
Koks	25,2	14,0	8,9	85,8	28,8	9,9
Kondensat, gesamt	74,2	81,4	78,5	14,2	69,7	79,3
Zersetzungswasser	34,9	46,1	49,6	13,6	44,1	56,7
Teer/Öl	39,3	35,3	28,9	0,7	25,5	22,6
Gas	0,5	4,6	12,6	0,0	1,5	10,8
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
N-Verteilung			in %			
Koks	42,2	37,5	91,8	96,1	41,0	62,6
Kondensat, gesamt	57,8	62,5	8,2	3,9	59,0	37,4
Zersetzungswasser	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Teer/Öl	57,8	62,5	8,2	3,9	59,0	37,4
Gas	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
O(+SC)-Verteilung			in %			
Koks	5,7	1,9	2,3	75,3	8,4	1,0
Kondensat, gesamt	62,3	59,9	60,0	18,9	69,0	59,2
Zersetzungswasser	35,3	46,7	50,1	13,2	43,0	55,2
Teer/Öl	27,0	13,3	9,9	5,7	25,9	3,9
Gas	32,0	38,2	37,7	5,8	22,6	39,8
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang J - 4: Energieinhalte der Produkte und „Reaktionsenthalpie“ bei der Pyrolyse von Xylan (1234) und Xylan (Birkenholz, 2664) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Einsatzstoff	Xylan (1234)			Xylan, Birkenholz (2664)		
Temperatur in °C	**374**	**486**	**700**	**265**	**403**	**703**
Aufheizrate in K/min	55	87	169	49	100	163
Koks			in kJ/kg (wf)			
Brennwert	24.369	23.618	22.627	17.969	25.374	25.442
Heizwert	23.453	23.018	22.234	16.769	24.400	25.007
Pyrolysegas			in kJ/kg (wf)			
Brennwert	4.255	5.585	8.249	2.455	6.992	6.386
Heizwert	4.235	5.446	7.807	2.453	6.911	6.072
Kondensat, gesamt			in kJ/kg (wf)			
Brennwert	16.314	17.337	16.957	9.038	14.157	15.748
Heizwert	14.212	15.188	14.904	6.688	12.072	13.663
Teer/Öl			in kJ/kg (wf)			
Brennwert	27.610	28.986	27.540	27.656	26.414	31.976
Heizwert	25.785	27.066	25.771	25.567	24.703	30.325
Zersetzungswasser			in kJ/kg (wf)			
Brennwert	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442
Heizwert	0	0	0	0	0	0
$\Delta_R H_{Chem}$ (P-BM)			in kJ/kg (wf)			
Brennwert	889	-942	-1.395	262	1.227	-1.555
Heizwert	824	-969	-1.418	179	1.073	-1.532
Koks			in kJ/kg (waf)			
Brennwert	32.679	33.802	32.783	19.510	31.368	33.845
Heizwert	31.451	32.943	32.214	18.208	30.163	33.267
$\Delta_R H_{Chem}$ (P-BM)			in kJ/kg (waf)			
Brennwert	970	-1.028	-1.522	281	1.315	-1.667
Heizwert	899	-1.057	-1.547	192	1.151	-1.643

Tab Anhang J - 5: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff chemisch gebundenen Energie auf die Produkte bei der Pyrolyse von Xylan (1234) und Xylan (Birkenholz, 2664)) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Einsatzstoff	Xylan (1234)			Xylan, Birkenholz (2664)		
Temperatur in °C	**374**	**486**	**700**	**265**	**403**	**703**
Aufheizrate in K/min	55	87	169	49	100	163
Koks			in % (wf)			
Brennwert	48,4	39,6	36,9	92,7	54,1	41,8
Heizwert	50,2	41,6	39,1	93,3	56,1	44,3
Pyrolysegas			in % (wf)			
Brennwert	5,3	8,6	13,0	0,6	6,8	10,7
Heizwert	5,7	9,0	13,2	0,6	7,3	10,9
Kondensat, gesamt			in % (wf)			
Brennwert	51,6	46,1	41,7	8,3	46,5	38,1
Heizwert	49,4	43,1	38,4	7,3	43,6	34,8
Teer/Öl			in % (wf)			
Brennwert	49,1	42,8	38,1	7,3	43,3	34,1
Heizwert	49,4	43,1	38,4	7,3	43,6	34,8
Zersetzungswasser			in % (wf)			
Brennwert	2,5	3,3	3,6	1,0	3,2	4,1
Heizwert	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
$\Delta_R H_{Chem}$ (P-BM)			in % (wf)			
Brennwert	5,4	-5,7	-8,4	1,6	7,4	-9,4
Heizwert	5,4	-6,3	-9,3	1,2	7,0	-10,0

Tab Anhang J - 6: Gaszusammensetzung, Ausbeuten der Gaskomponenten und Gasdichte bei der Pyrolyse von Xylan (1234) und Xylan (Birkenholz, 2664) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Einsatzstoff	Xylan (1234)			Xylan, Birkenholz (2664)		
Temperatur in °C	**374**	**486**	**700**	**265**	**403**	**703**
Aufheizrate in K/min	55	87	169	49	100	163
Gaszusammensetzung			in Vol.-%			
H2	0,39	2,63	16,85	0,06	4,96	10,56
Methan	0,71	4,60	7,64	0,00	1,31	8,03
CO	49,86	42,20	32,90	33,27	67,00	23,49
CO2	48,81	48,92	40,48	66,61	26,65	55,02
Ethin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H2S	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
COS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Propin	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ethan	0,15	0,98	1,28	0,07	0,06	1,79
Ethen	0,00	0,13	0,18	0,00	0,00	0,29
Propan	0,03	0,24	0,33	0,00	0,01	0,40
Propen	0,04	0,24	0,29	0,00	0,02	0,39
i-Butan	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01
N-Butan	0,00	0,04	0,03	0,00	0,00	0,02
Summe	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Gasausbeute			in l i.N./kg (wf)			
H2	0,51	4,28	33,30	0,01	5,79	19,52
Methan	0,92	7,51	15,10	0,00	1,53	14,85
CO	64,70	68,83	65,03	7,15	78,30	43,43
CO2	63,33	79,80	80,02	14,32	31,14	101,73
Ethin	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
H2S	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
COS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Propin	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ethan	0,20	1,60	2,54	0,01	0,07	3,31
Ethen	0,00	0,22	0,36	0,00	0,00	0,54
Propan	0,04	0,39	0,66	0,00	0,01	0,73
Propen	0,05	0,40	0,58	0,00	0,02	0,71
i-Butan	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01
N-Butan	0,00	0,07	0,06	0,00	0,00	0,04
Summe	129,76	163,11	197,66	21,49	116,87	184,90
Gasdichte in kJ/m^3 i.N.	1,60	1,56	1,31	1,73	1,38	1,49

Pyrolyse von Fichte-Sulfit-Zellstoff (2621) im Festbettreaktor unter Variation der Temperatur (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung)

Tab Anhang J - 7: Produktverteilung bei der Pyrolyse von Fichte-Sulfit-Zellstoff (2621) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**271**	**313**	**342**	**416**	**514**	**605**	**702**
Aufheizrate in K/min	30	42	45	53	77	107	141
Ausbeuten				in Ma.-% (wf)			
Koks	95,2	79,4	38,8	20,1	17,1	17,1	13,1
Kondensat	4,2	18,0	52,9	67,5	68,0	64,7	66,1
Teer/Öl	2,6	10,4	33,4	47,2	45,1	43,8	49,0
Zersetzungswasser	1,6	7,6	19,5	20,3	22,9	20,9	17,1
Gas	0,7	2,6	8,3	12,5	14,9	18,2	20,7
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Ausbeuten				in Ma.-% (waf)			
Koks	95,1	79,2	38,3	19,4	16,4	16,4	12,4
Kondensat	4,2	18,2	53,3	68,0	68,6	65,2	66,7
Teer/Öl	2,6	10,4	33,0	46,4	44,1	42,3	47,7
Zersetzungswasser	1,6	7,8	20,3	21,6	24,5	22,9	19,0
Gas	0,7	2,6	8,4	12,6	15,1	18,4	20,9
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang J - 8: Produktzusammensetzung bei der Pyrolyse von Fichte-Sulfit-Zellstoff (2621) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**271**	**313**	**342**	**416**	**514**	**605**	**702**
Aufheizrate in K/min	30	42	45	53	77	107	141
Koks				in Ma.-% (wf)			
A	0,8	1,0	2,1	4,0	4,7	4,7	6,1
FB	90,3	85,8	62,2	32,3	21,6	15,0	9,3
Cfix	8,8	13,1	35,8	63,7	73,6	80,3	84,6
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
C	46,4	48,8	61,5	76,8	79,6	83,3	78,7
H	6,0	5,9	5,2	4,2	3,3	2,8	2,1
N	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2
O+SC	46,6	44,2	31,2	14,9	12,2	9,0	12,8
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Pyrolysegas				in Ma.-% (wf)			
C	31,1	32,3	32,0	33,2	34,9	35,9	36,6
H	0,1	0,1	0,1	0,4	1,2	1,7	2,3
N	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
O+SC	68,7	67,6	67,8	66,4	64,0	62,4	61,1
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Kondensat, gesamt				in Ma.-% (wf)			
A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C	38,3	35,3	36,8	39,2	40,0	39,0	42,4
H	7,5	7,3	7,5	7,6	7,8	8,1	8,0
N	1,9	0,7	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
O+SC	52,3	56,7	55,4	53,0	52,0	52,7	49,4
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Teer/Öl				in Ma.-% (wf)			
A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C	61,5	61,0	58,3	56,0	60,3	57,5	57,2
H	5,3	4,4	5,4	6,1	6,0	6,6	6,9
N	3,1	1,3	0,5	0,3	0,3	0,4	0,3
O+SC	30,1	33,3	35,9	37,6	33,3	35,5	35,7
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Zersetzungswasser				in Ma.-% (wf)			
H	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2
O	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang J - 9: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff enthaltenen Elemente auf die Produkte bei der Pyrolyse von Fichte-Sulfit-Zellstoff (2621) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**271**	**313**	**342**	**416**	**514**	**605**	**702**
Aufheizrate in K/min	30	42	45	53	77	107	141
C-Verteilung				in %			
Koks	96,1	84,4	51,9	33,6	29,2	30,8	22,2
Kondensat, gesamt	3,5	13,8	42,3	57,4	59,4	55,0	61,3
Zersetzungswasser	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Teer/Öl	3,5	13,8	42,3	57,4	59,4	55,0	61,3
Gas	0,4	1,8	5,8	9,0	11,3	14,2	16,5
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
H-Verteilung				in %			
Koks	94,8	78,2	33,6	13,9	9,3	8,0	4,5
Kondensat, gesamt	5,2	21,7	66,2	85,2	87,8	86,7	87,5
Zersetzungswasser	2,9	14,3	37,4	39,8	45,1	42,2	35,0
Teer/Öl	2,3	7,4	28,7	45,4	42,8	44,5	52,5
Gas	0,0	0,0	0,2	0,9	2,9	5,3	8,1
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
N-Verteilung				in %			
Koks	55,1	23,2	13,6	12,1	14,6	11,8	15,6
Kondensat, gesamt	44,9	76,8	86,4	87,9	85,4	88,2	84,4
Zersetzungswasser	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Teer/Öl	44,9	76,8	86,4	87,9	85,4	88,2	84,4
Gas	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
O(+SC)-Verteilung				in %			
Koks	94,4	74,6	25,7	6,3	4,7	3,4	3,9
Kondensat, gesamt	4,6	21,7	62,3	76,1	74,9	72,4	69,2
Zersetzungswasser	3,0	14,4	37,2	39,2	43,8	40,5	33,2
Teer/Öl	1,7	7,3	25,0	36,9	31,1	31,9	36,0
Gas	1,0	3,7	12,0	17,6	20,3	24,2	26,9
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang J - 10: Energieinhalte der Produkte und „Reaktionsenthalpie“ bei der Pyrolyse von Fichte-Sulfit-Zellstoff (2621) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**271**	**313**	**342**	**416**	**514**	**605**	**702**
Aufheizrate in K/min	30	42	45	53	77	107	141
Koks				in kJ/kg (wf)			
Brennwert	18.058	19.046	23.786	29.791	30.976	31.940	32.580
Heizwert	16.747	17.749	22.646	28.884	30.253	31.321	32.129
Pyrolysegas				in kJ/kg (wf)			
Brennwert	2.595	3.306	3.206	4.204	5.993	7.275	8.491
Heizwert	2.577	3.296	3.188	4.144	5.829	7.018	8.120
Kondensat, gesamt				in kJ/kg (wf)			
Brennwert	-	-	16.969	17.425	19.251	17.527	19.068
Heizwert	-	-	15.058	15.656	17.185	15.709	17.274
Teer/Öl				in kJ/kg (wf)			
Brennwert	-	-	25.444	23.854	27.779	24.716	24.858
Heizwert	-	-	23.843	22.375	25.905	23.195	23.291
Zersetzungswasser				in kJ/kg (wf)			
Brennwert	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442
Heizwert	0	0	0	0	0	0	0
$\Delta_R H_{Chem}$ (P-BM)				in kJ/kg (wf)			
Brennwert	-	-	595	382	1.394	242	777
Heizwert	-	-	456	314	1.157	228	771
Koks				in kJ/kg (waf)			
Brennwert	18.212	19.241	24.291	31.097	32.200	33.365	34.286
Heizwert	16.890	17.931	23.126	30.150	31.448	32.719	33.811
$\Delta_R H_{Chem}$ (P-BM)				in kJ/kg (waf)			
Brennwert	-	-	439	136	998	-200	334
Heizwert	-	-	293	56	752	-230	313

Tab Anhang J - 11: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff chemisch gebundenen Energie auf die Produkte bei der Pyrolyse von Fichte-Sulfit-Zellstoff (2621) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**271**	**313**	**342**	**416**	**514**	**605**	**702**
Aufheizrate in K/min	30	42	45	53	77	107	141
Koks				in % (wf)			
Brennwert	96,2	84,6	51,7	33,4	29,6	30,5	24,0
Heizwert	96,3	85,1	53,1	35,0	31,2	32,3	25,5
Pyrolysegas				in % (wf)			
Brennwert	0,1	0,5	1,5	2,9	5,0	7,4	9,8
Heizwert	0,1	0,5	1,6	3,1	5,3	7,7	10,2
Kondensat, gesamt				in % (wf)			
Brennwert	-	-	50,2	65,8	73,2	63,4	70,5
Heizwert	-	-	48,1	63,8	70,6	61,4	69,0
Teer/Öl				in % (wf)			
Brennwert	-	-	47,5	63,0	70,1	60,6	68,2
Heizwert	-	-	48,1	63,8	70,6	61,4	69,0
Zersetzungswasser				in % (wf)			
Brennwert	0,2	1,0	2,7	2,8	3,1	2,9	2,3
Heizwert	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
$\Delta_R H_{Chem}$ (P-BM)				in % (wf)			
Brennwert	-	-	3,3	2,1	7,8	1,4	4,3
Heizwert	-	-	2,8	1,9	7,0	1,4	4,7

Tab Anhang J - 12: Gaszusammensetzung, Ausbeuten der Gaskomponenten und Gasdichte bei der Pyrolyse von Fichte-Sulfit-Zellstoff (2621) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Temperatur in °C	**271**	**313**	**342**	**416**	**514**	**605**	**702**
Aufheizrate in K/min	30	42	45	53	77	107	141
Gaszusammensetzung				in Vol.-%			
H2	0,03	0,10	0,57	0,55	2,00	4,37	9,28
Methan	0,00	0,30	0,69	2,46	6,12	8,78	9,81
CO	30,25	41,40	38,52	40,93	41,12	40,30	38,92
CO2	68,71	57,97	60,00	55,15	48,71	44,18	39,45
Ethin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
H2S	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
COS	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Propin	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
Ethan	0,81	0,21	0,09	0,38	0,91	1,03	1,05
Ethen	0,00	0,00	0,00	0,19	0,52	0,61	0,69
Propan	0,00	0,00	0,03	0,10	0,17	0,19	0,19
Propen	0,01	0,01	0,10	0,23	0,43	0,51	0,58
i-Butan	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
N-Butan	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01
Summe	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Gasausbeute				in l i.N./kg (wf)			
H2	0,00	0,01	0,28	0,42	1,94	5,43	13,89
Methan	0,00	0,05	0,34	1,88	5,85	10,83	14,70
CO	1,15	6,38	19,11	31,22	39,55	49,62	58,27
CO2	2,61	8,93	29,77	42,06	46,86	54,44	59,08
Ethin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
H2S	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
COS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Propin	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02
Ethan	0,03	0,03	0,04	0,29	0,87	1,27	1,57
Ethen	0,00	0,00	0,00	0,14	0,50	0,76	1,04
Propan	0,00	0,00	0,01	0,08	0,17	0,23	0,28
Propen	0,00	0,00	0,05	0,17	0,41	0,63	0,87
i-Butan	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
N-Butan	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01
Summe	3,79	15,40	49,61	76,28	96,15	123,24	149,74
Gasdichte in kJ/m^3 i.N.	1,75	1,67	1,68	1,63	1,55	1,48	1,38

Pyrolyse von Lignin (Alkali, 2623 und 2665) im Festbettreaktor unter Variation der Temperatur (Körnung: < 2 mm; Schnellaufheizung)

Tab Anhang J - 13: Produktverteilung bei der Pyrolyse von Lignin (Alkali, 2623 und 2665) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Einsatzstoff	Lignin, Alkali (2623)			Lignin, Alkali (2665)			
Temperatur in °C	**403**	**497**	**702**	**312**	**429**	**501**	**707**
Aufheizrate in K/min	96	104	107	67	84	124	146
Ausbeuten	in Ma.-% (wf)						
Koks	81,8	68,8	62,3	94,6	78,2	72,8	60,4
Kondensat	11,7	21,4	22,8	4,4	15,9	19,9	23,8
Teer/Öl	4,0	10,3	8,6	-	10,0	11,5	12,3
Zersetzungswasser	7,7	11,1	14,1	-	5,9	8,4	11,5
Gas	6,5	9,9	15,0	0,9	6,0	7,3	15,9
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Ausbeuten	in Ma.-% (waf)						
Koks	77,7	61,7	53,8	93,5	73,5	67,0	51,9
Kondensat	14,4	26,2	27,9	5,4	19,3	24,2	28,8
Teer/Öl	4,9	12,6	10,6	-	12,1	13,9	14,9
Zersetzungswasser	9,4	13,6	17,3	-	7,1	10,3	13,9
Gas	7,9	12,1	18,3	1,1	7,2	8,8	19,3
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang J - 14: Produktzusammensetzung bei der Pyrolyse von Lignin (Alkali, 2623 und 2665) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Einsatzstoff	Lignin, Alkali (2623)			Lignin, Alkali (2665)			
Temperatur in °C	**403**	**497**	**702**	**312**	**429**	**501**	**707**
Aufheizrate in K/min	96	104	107	67	84	124	146
Koks	in Ma.-% (wf)						
A	22,5	26,7	29,5	18,6	22,6	24,2	29,2
FB	38,1	30,9	22,7	44,1	36,5	33,2	19,7
Cfix	39,5	42,4	47,8	37,2	41,0	42,5	51,0
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
C	57,9	60,9	65,6	54,1	58,2	60,5	66,5
H	3,7	3,1	2,0	4,5	3,7	3,3	1,5
N	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
O+SC	15,8	9,3	2,7	22,6	15,5	11,9	2,7
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Pyrolysegas	in Ma.-% (wf)						
C	28,7	29,8	32,0	28,4	29,3	29,8	32,4
H	0,3	0,9	5,1	0,1	0,5	0,8	6,0
N	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
O+SC	71,0	69,4	62,9	71,5	70,1	69,4	61,7
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Kondensat, gesamt	in Ma.-% (wf)						
A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C	22,5	33,0	27,2	51,9	41,3	38,1	35,8
H	12,2	10,8	10,8	3,0	9,7	9,8	10,9
N	0,3	0,2	0,2	0,4	0,1	0,0	0,0
O+SC	65,0	55,9	61,8	44,6	48,9	52,0	53,2
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Teer/Öl	in Ma.-% (wf)						
A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C	65,7	68,9	71,7	-	65,6	66,2	69,3
H	14,1	10,4	10,2	-	8,9	8,8	10,6
N	0,9	0,4	0,6	-	0,1	0,1	0,1
O+SC	19,2	20,2	17,5	-	25,4	24,9	20,0
Summe	100,0	100,0	100,0	-	100,0	100,0	100,0
Zersetzungswasser	in Ma.-% (wf)						
H	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2
O	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8	88,8
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang J - 15: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff enthaltenen Elemente auf die Produkte bei der Pyrolyse von Lignin (Alkali, 2623 und 2665) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Einsatzstoff	Lignin, Alkali (2623)			Lignin, Alkali (2665)			
Temperatur in °C	**403**	**497**	**702**	**312**	**429**	**501**	**707**
Aufheizrate in K/min	96	104	107	67	84	124	146
C-Verteilung				in %			
Koks	91,3	80,7	78,8	95,2	84,6	81,8	74,6
Kondensat, gesamt	5,1	13,6	11,9	4,3	12,2	14,1	15,8
Zersetzungswasser	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Teer/Öl	5,1	13,6	11,9	4,3	12,2	14,1	15,8
Gas	3,6	5,7	9,2	0,5	3,2	4,0	9,6
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
H-Verteilung				in %			
Koks	67,7	46,7	28,2	97,0	64,4	54,4	20,3
Kondensat, gesamt	31,8	51,5	54,8	3,0	34,8	44,2	58,4
Zersetzungswasser	19,2	27,7	35,2	-	14,8	21,3	29,0
Teer/Öl	12,6	23,8	19,6	-	20,0	22,9	29,5
Gas	0,5	1,9	17,0	0,0	0,7	1,4	21,3
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
N-Verteilung				in %			
Koks	70,6	62,5	60,1	81,7	85,3	90,0	90,7
Kondensat, gesamt	29,4	37,5	39,9	18,3	14,7	10,0	9,3
Zersetzungswasser	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Teer/Öl	29,4	37,5	39,9	18,3	14,7	10,0	9,3
Gas	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
O(+SC)-Verteilung				in %			
Koks	51,5	25,3	6,7	89,0	50,3	35,9	6,7
Kondensat, gesamt	30,3	47,5	55,9	8,2	32,3	43,1	52,6
Zersetzungswasser	27,2	39,3	49,9	-	21,7	31,2	42,4
Teer/Öl	3,1	8,3	6,0	-	10,6	11,9	10,2
Gas	18,3	27,2	37,4	2,8	17,4	21,0	40,7
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab Anhang J - 16: Energieinhalte der Produkte und „Reaktionsenthalpie“ bei der Pyrolyse von Lignin (Alkali, 2623 und 2665) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Einsatzstoff	Lignin, Alkali (2623)			Lignin, Alkali (2665)			
Temperatur in °C	**403**	**497**	**702**	**312**	**429**	**501**	**707**
Aufheizrate in K/min	96	104	107	67	84	124	146
Koks				in kJ/kg (wf)			
Brennwert	22.387	22.586	23.899	22.260	22.468	22.635	23.529
Heizwert	21.574	21.919	23.455	21.270	21.671	21.912	23.204
Pyrolysegas				in kJ/kg (wf)			
Brennwert	1.465	2.790	10.765	796	2.023	2.809	12.400
Heizwert	1.427	2.686	9.774	789	1.958	2.707	11.129
Kondensat, gesamt				in kJ/kg (wf)			
Brennwert	12.600	15.115	12.290	-	20.606	19.191	15.648
Heizwert	10.203	12.853	9.998	-	18.295	16.891	13.402
Teer/Öl				in kJ/kg (wf)			
Brennwert	32.157	28.867	28.406	-	31.275	31.503	27.979
Heizwert	29.847	26.800	26.359	-	29.041	29.308	25.916
Zersetzungswasser				in kJ/kg (wf)			
Brennwert	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442	2.442
Heizwert	0	0	0	0	0	0	0
$\Delta_R H_{Chem}$ (P-BM)				in kJ/kg (wf)			
Brennwert	-1.951	-2.799	-2.546	-	-901	-1.350	-1.964
Heizwert	-1.919	-2.770	-2.511	-	-928	-1.376	-1.929
Koks				in kJ/kg (waf)			
Brennwert	28.870	30.818	33.899	27.363	29.020	29.880	33.246
Heizwert	27.820	29.909	33.270	26.146	27.992	28.925	32.788
$\Delta_R H_{Chem}$ (P-BM)				in kJ/kg (waf)			
Brennwert	-2.152	-4.039	-3.683	-	-1.094	-1.640	-2.385
Heizwert	-2.112	-4.013	-3.649	-	-1.127	-1.671	-2.342

Tab Anhang J - 17: Prozentuale Verteilung der im Einsatzstoff chemisch gebundenen Energie auf die Produkte bei der Pyrolyse von Lignin (Alkali, 2623 und 2665) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Einsatzstoff	Lignin, Alkali (2623)			Lignin, Alkali (2665)			
Temperatur in °C	**403**	**497**	**702**	**312**	**429**	**501**	**707**
Aufheizrate in K/min	96	104	107	67	84	124	146
Koks				in % (wf)			
Brennwert	83,9	71,1	68,2	96,4	80,4	75,4	65,0
Heizwert	84,6	72,3	70,0	96,4	81,1	76,4	67,1
Pyrolysegas				in % (wf)			
Brennwert	0,4	1,3	7,4	0,0	0,6	0,9	9,0
Heizwert	0,4	1,3	7,0	0,0	0,6	0,9	8,5
Kondensat, gesamt				in % (wf)			
Brennwert	6,8	14,8	12,8	-	15,0	17,5	17,0
Heizwert	5,7	13,2	10,9	-	13,9	16,1	15,2
Teer/Öl				in % (wf)			
Brennwert	5,9	13,6	11,2	-	14,3	16,6	15,7
Heizwert	5,7	13,2	10,9	-	13,9	16,1	15,2
Zersetzungswasser				in % (wf)			
Brennwert	0,9	1,2	1,6	-	0,7	0,9	1,3
Heizwert	0,0	0,0	0,0	-	0,0	0,0	0,0
$\Delta_R H_{Chem}$ (P-BM)				in % (wf)			
Brennwert	-8,9	-12,8	-11,7	-	-4,1	-6,2	-9,0
Heizwert	-9,2	-13,3	-12,0	-	-4,4	-6,6	-9,2

Tab Anhang J - 18: Gaszusammensetzung, Ausbeuten der Gaskomponenten und Gasdichte bei der Pyrolyse von Lignin (Alkali, 2623 und 2665) für verschiedene Temperaturen im Festbettreaktor (Körnung: < 2 mm, Schnellaufheizung)

Einsatzstoff	Lignin, Alkali (2623)			Lignin, Alkali (2665)			
Temperatur in °C	**403**	**497**	**702**	**312**	**429**	**501**	**707**
Aufheizrate in K/min	96	104	107	67	84	124	146
Gaszusammensetzung				in Vol.-%			
H2	0,06	0,31	31,38	0,02	0,39	0,31	36,81
Methan	2,74	7,24	13,76	0,19	4,82	7,11	13,20
CO	10,25	11,86	9,16	9,75	11,64	12,83	10,42
CO2	85,71	78,58	41,41	89,70	82,13	77,79	35,69
Ethin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H2S	1,05	1,59	3,07	0,06	0,85	1,65	2,88
COS	0,02	0,02	0,07	0,00	0,00	0,01	0,02
Propin	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ethan	0,11	0,24	0,78	0,28	0,09	0,20	0,65
Ethen	0,00	0,02	0,12	0,00	0,00	0,00	0,12
Propan	0,02	0,05	0,11	0,00	0,02	0,04	0,10
Propen	0,03	0,06	0,12	0,00	0,04	0,06	0,10
i-Butan	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
N-Butan	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Summe	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Gasausbeute				in l i.N./kg (wf)			
H2	0,02	0,17	41,67	0,00	0,13	0,13	57,09
Methan	0,95	4,00	18,27	0,01	1,58	2,91	20,47
CO	3,57	6,55	12,16	0,47	3,81	5,25	16,16
CO2	29,80	43,38	54,98	4,37	26,87	31,81	55,35
Ethin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
H2S	0,37	0,88	4,08	0,00	0,28	0,67	4,46
COS	0,01	0,01	0,10	0,00	0,00	0,00	0,02
Propin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ethan	0,04	0,13	1,04	0,01	0,03	0,08	1,00
Ethen	0,00	0,01	0,16	0,00	0,00	0,00	0,19
Propan	0,01	0,03	0,15	0,00	0,01	0,02	0,16
Propen	0,01	0,04	0,15	0,00	0,01	0,02	0,16
i-Butan	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
N-Butan	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
Summe	34,77	55,20	132,77	4,87	32,72	40,90	155,08
Gasdichte in kJ/m^3 i.N.	1,86	1,78	1,13	1,90	1,82	1,78	1,02

Anhang K Ergebnisse der thermogravimetrischen Untersuchungen

Untersuchungen zum Pyrolysewärmebedarf mittels TG-DSC

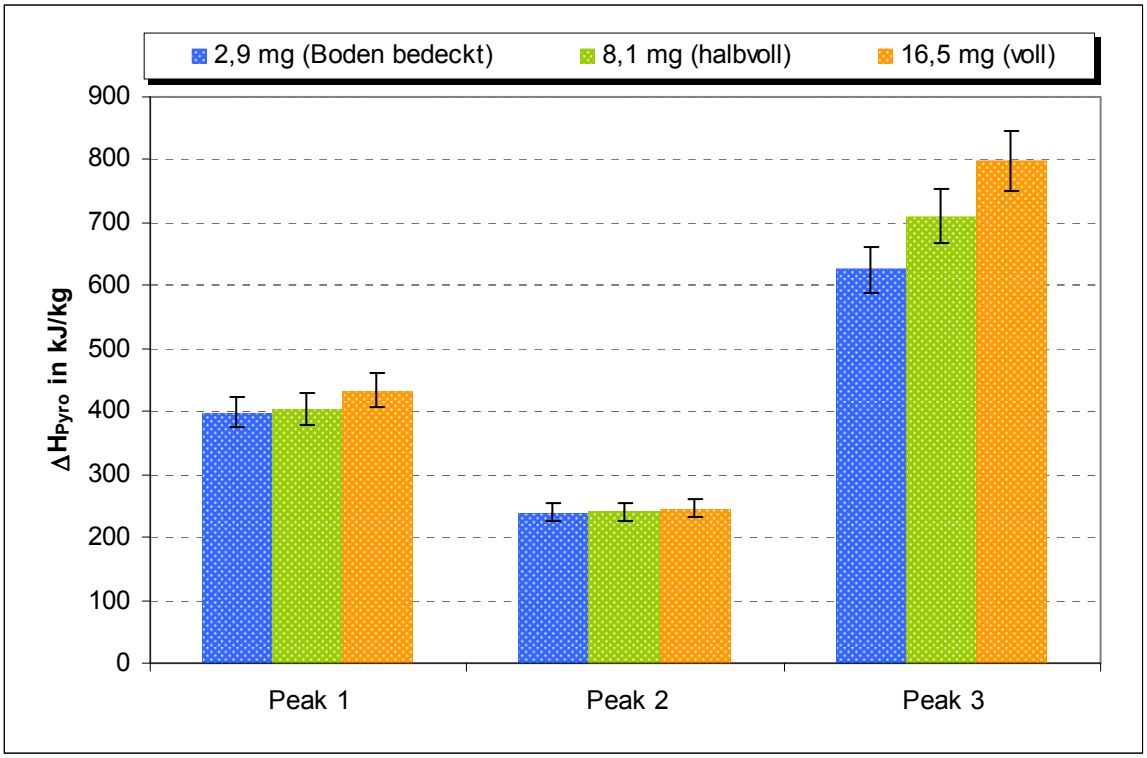


Abb Anhang K - 1: Einfluss der Einwaage auf die Reaktionsenthalpie bei der Zersetzung von Calciumoxalat unter Stickstoffatmosphäre (Gerät: TG-DSC Netzsch STA 409, 20 K/min)

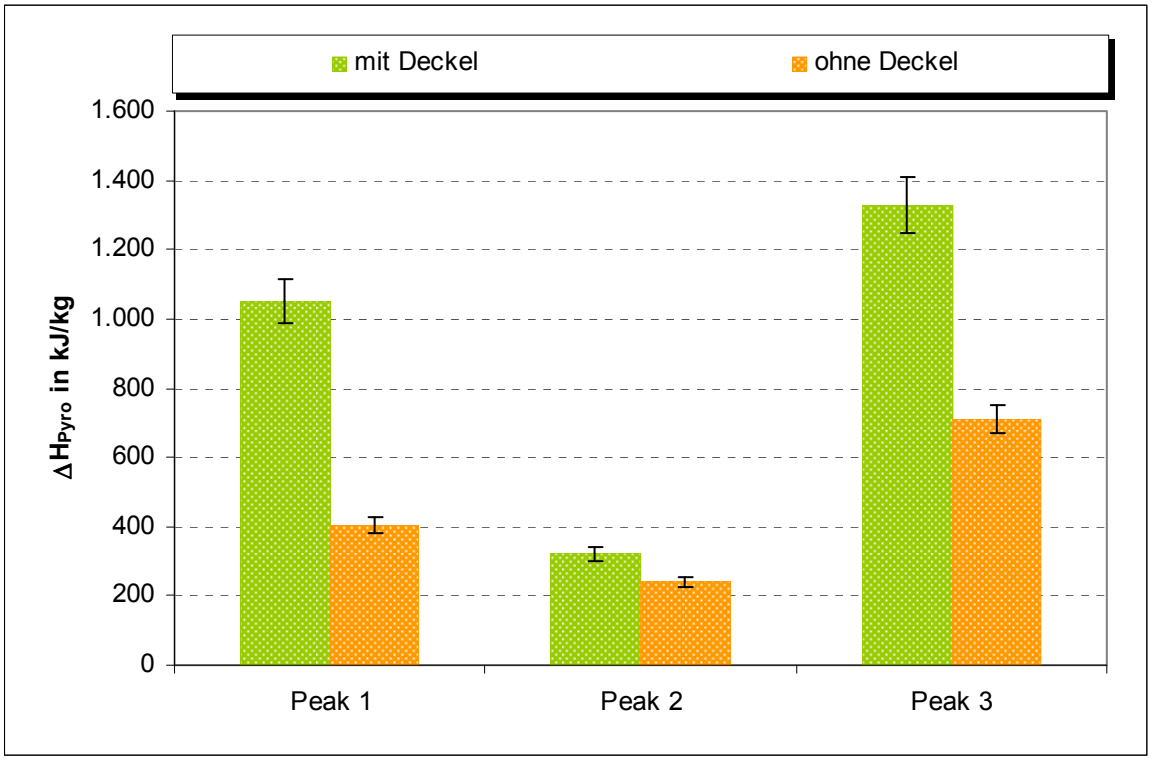


Abb Anhang K - 2: **Einfluss der Benutzung eines Deckels auf die Reaktionsenthalpie bei der Zersetzung von Calciumoxalat unter Stickstoffatmosphäre (Gerät: TG-DSC Netzsch STA 409, 20 K/min)**

Tab Anhang K - 1: Ergebnisse der DSC-Messungen für verschiedene Biomassen und die Biopolymere für die Pyrolyse bei einer Aufheizrate von 20 K/min

	Rohstoff	IEC-Nr.	Peak	Reaktions-enthalpie in kJ/kg	Wärme-tönung	Onset-temperatur in °C	Peak-temperatur in °C
Biopolymere	Xylan		*Peak1*	*-232,6*	*exo*	*228,3*	*300,6*
			Peak2	*32,9*	*endo*	*498,8*	*543,9*
			gesamt	-199,7	exo	-	-
	Birkenholz-Xylan	2664		-239,5	exo	271,4	302,1
	Cellulose	2625		456,2	endo	314,4	348,9
	Fichtesulfitzellstoff	2621		236,3	endo	344,8	373,6
	Organosolv-Lignin	2624		-269,7	exo	322,8	432,2
	Alkali-Lignin	2623	*Peak1*	*-166,6*	*exo*	*326,1*	*371,6*
			Peak2	*38,8*	*endo*	*507,7*	*51,9*
			Peak3	*-156,9*	*exo*	*794,0*	*837,0*
			gesamt	-284,7	exo	-	-
Stroh	Weizenstroh, gelb	2296		-74,0	exo	275,0	332,8
		2275		-82,6	exo	272,3	328,3
		2184		-19,3	exo	263,1	358,6
	Weizenstroh, grau	2297		-20,9	exo	276,4	322,5
		2279		-	-	-	-
	Rapsstroh	2386		-6,9	exo	335,4	350,2
Holz	Sägerestholz (Buche, rindenfrei)	2309		69,3	endo	341,0	373,4
	Sägerestholz (Fichte, rindenfrei)	2276		81,5	endo	350,0	381,7
	Industrierestholz (Spanplatte)	2277		44,2	endo	382,6	412,9
	Pappel (Kurzumtrieb)	2469		56,6	endo	334,9	370,4
	Waldrestholz (mit Rinde)	2472	*Peak1*	*41,3*	*endo*	*339,3*	*371,2*
			Peak2	*19,5*	*endo*	*462,4*	*600,9*
			gesamt	60,8	endo	-	-
Silage	Maissilage	2364	*Peak1*	*6,4*	*endo*	*265,2*	*304,1*
			Peak2	*-6,1*	*exo*	*332,3*	*349,8*
			gesamt	*0,3*	*endo*	-	-
		2475	*Peak1*	*5,0*	*endo*	*271,9*	*297,1*
			Peak2	*-3,7*	*exo*	*332,5*	*351,2*
			gesamt	1,3	endo	-	-
	Grassilage	2365	*Peak1*	*-19,7*	*exo*	*235,5*	*279,5*
			Peak2	*-12,9*	*exo*	*327,3*	*346,5*
			gesamt	-32,6	exo	-	-
	Gerste-GP-Silage	2366		-34,8	exo	280,5	335,5
	Grünschnitt-roggensilage	2474		-4,7	exo	327,5	348,6
	Roggen-GP-Silage	2473		-23,3	exo	300,5	374,1
Sonstiges Halmgut	Triticale-GP	2471		-22,8	exo	273,3	316,5
	Landschafts-pflegeheu	2480		-21,7	exo	262,8	348,0

Untersuchungen zum Einfluss von Druck und Aufheizgeschwindigkeit bei der Biomassepyrolyse mittels TGA

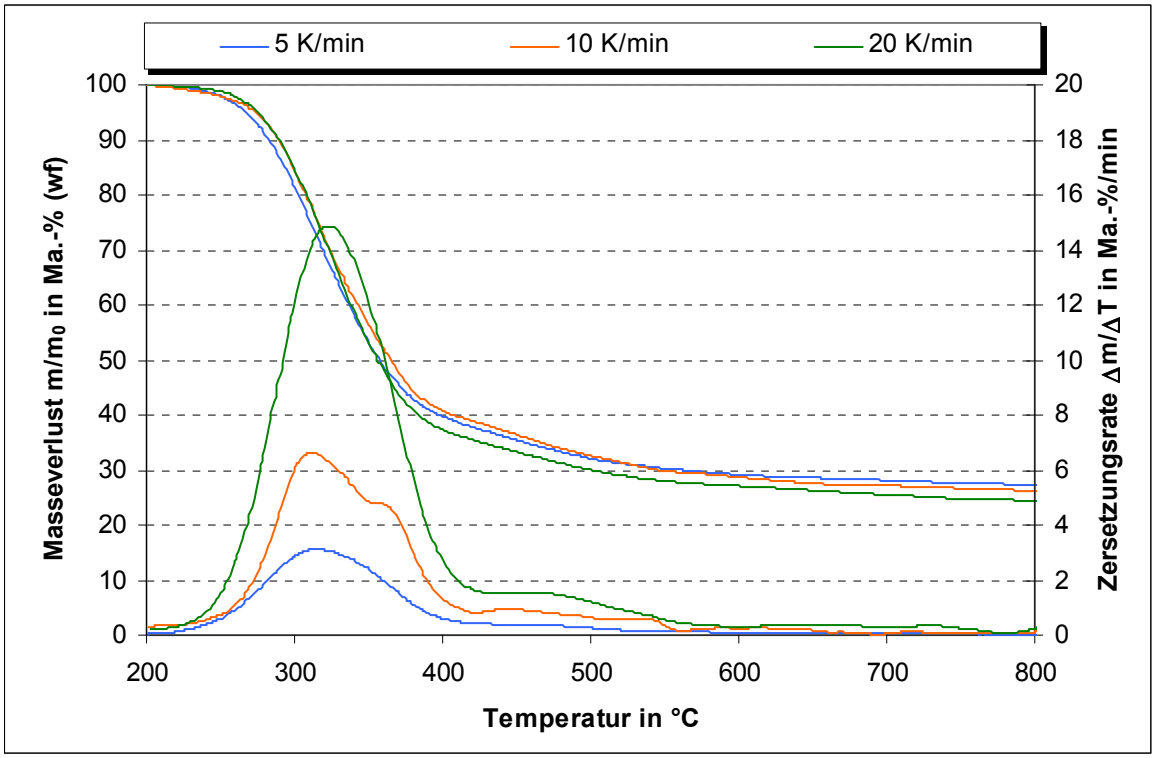


Abb Anhang K - 3: **Ergebnisse der thermogravimetrischen Untersuchungen zum Einfluss der Aufheizrate auf die Pyrolyse von Maissilage (2475) (1 bar, Stickstoffatmosphäre, < 2 mm; Gerät: HP-TGA DMT)**

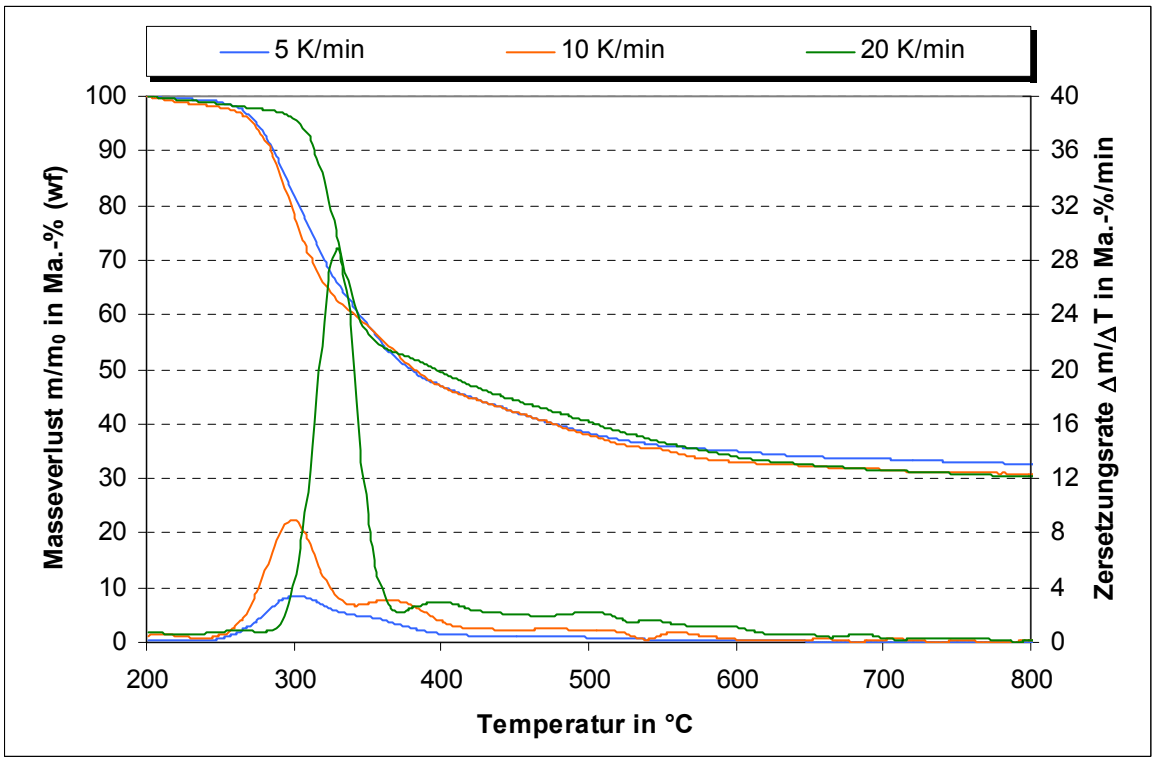


Abb Anhang K - 4: **Ergebnisse der thermogravimetrischen Untersuchungen zum Einfluss der Aufheizrate auf die Pyrolyse von Maissilage (2475) (30 bar, Stickstoffatmosphäre, < 2 mm; Gerät: HP-TGA DMT)**

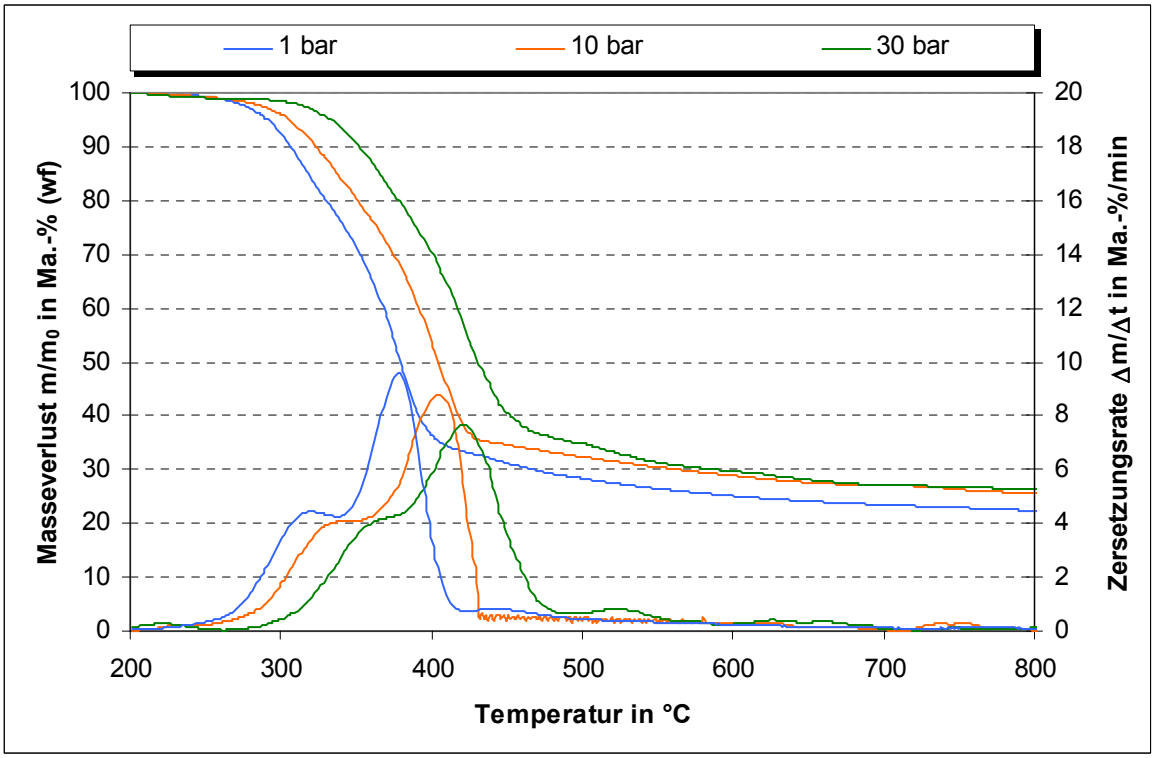


Abb Anhang K - 5: Ergebnisse der thermogravimetrischen Untersuchungen zum Druckeinfluss auf die Pyrolyse von Sägerestholz (Buche rindenfrei, 2309) (10 K/min, Stickstoffatmosphäre, < 2 mm; Gerät: HP-TGA DMT)

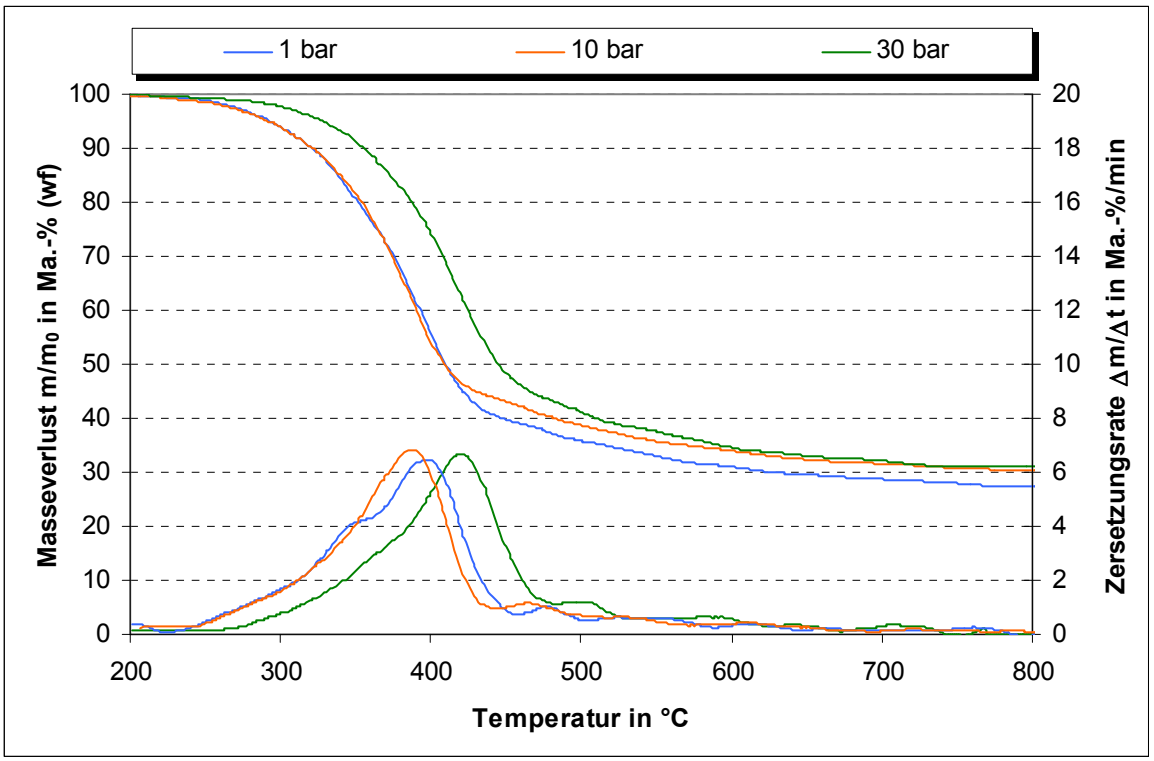


Abb Anhang K - 6: Ergebnisse der thermogravimetrischen Untersuchungen zum Druckeinfluss auf die Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) (10 K/min, Stickstoffatmosphäre, < 2 mm; Gerät: HP-TGA DMT)

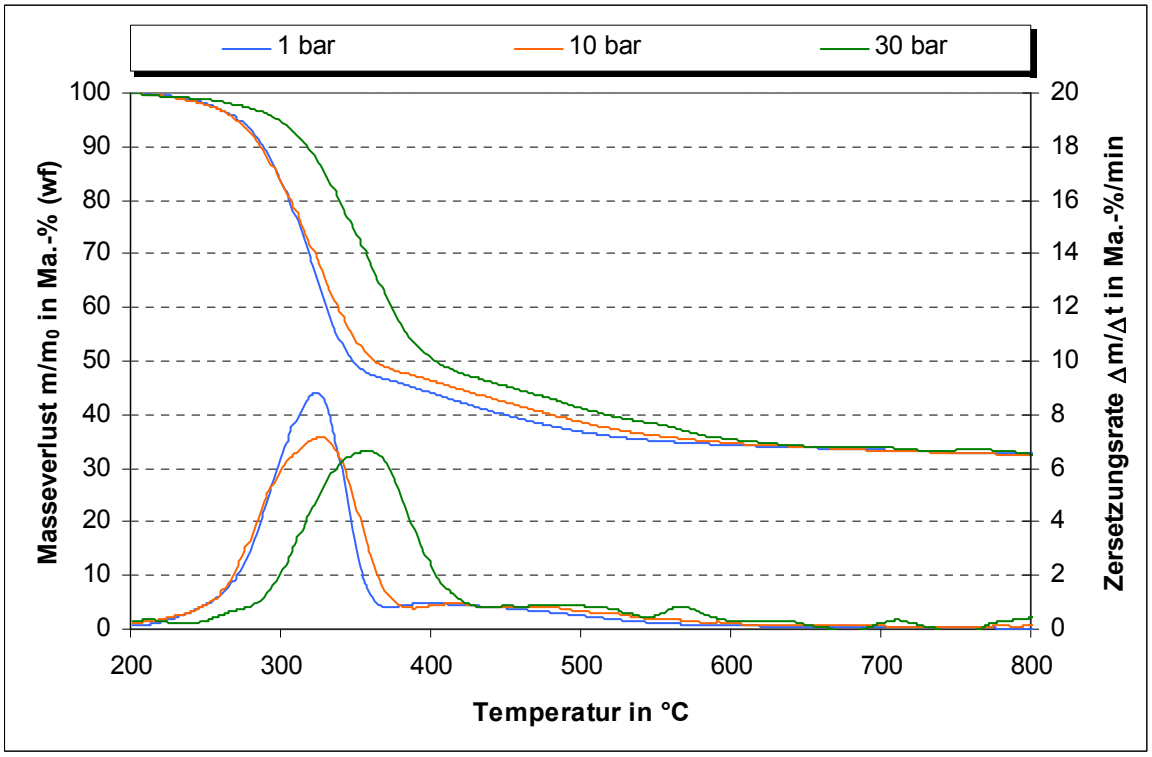


Abb Anhang K - 7: **Ergebnisse der thermogravimetrischen Untersuchungen zum Druckeinfluss auf die Pyrolyse von Weizenstroh (gelb, 2296) (10 K/min, Stickstoffatmosphäre, < 2 mm; Gerät: HP-TGA DMT)**

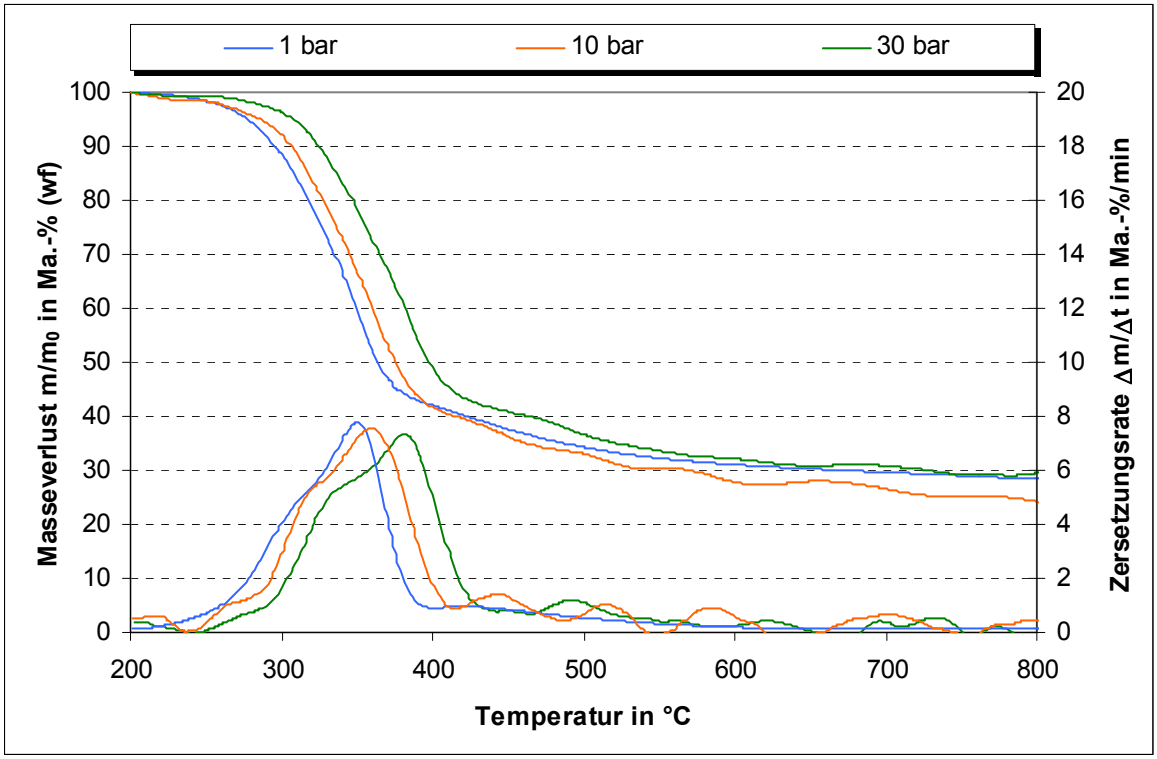


Abb Anhang K - 8: **Ergebnisse der thermogravimetrischen Untersuchungen zum Druckeinfluss auf die Pyrolyse von Weizenstroh (grau, 2297) (10 K/min, Stickstoffatmosphäre, < 2 mm; Gerät: HP-TGA DMT)**

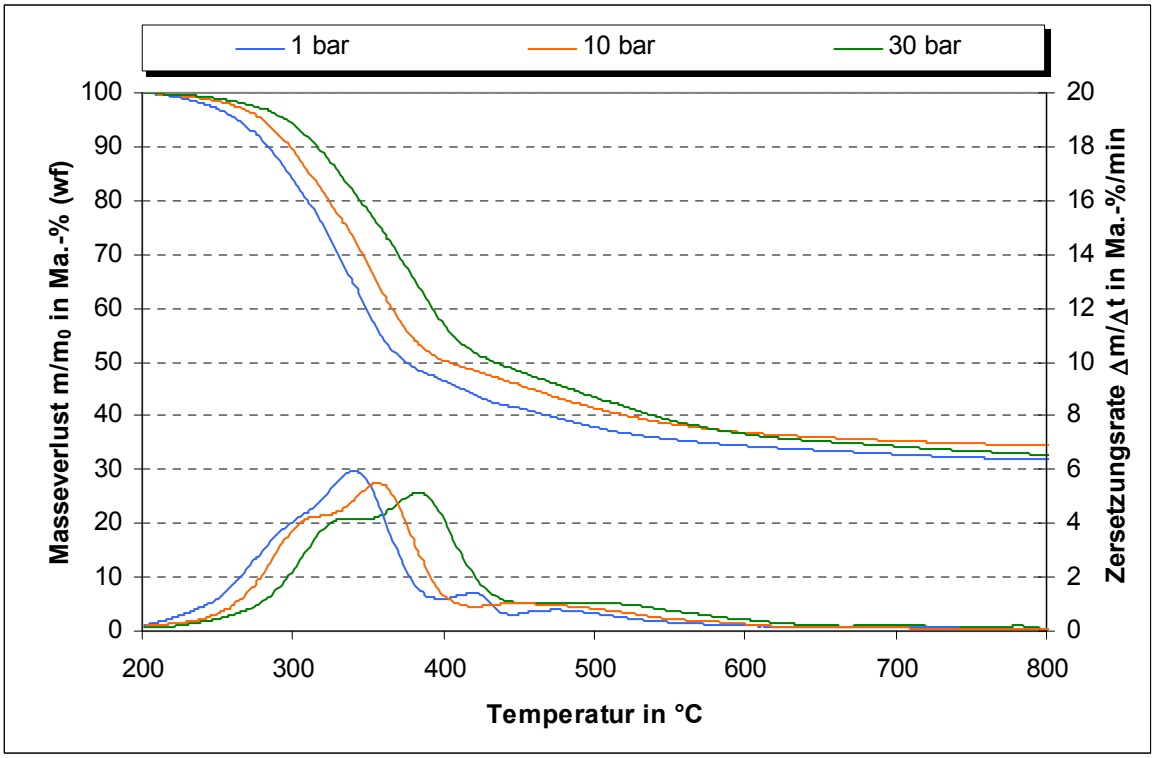


Abb Anhang K - 9: **Ergebnisse der thermogravimetrischen Untersuchungen zum Druckeinfluss auf die Pyrolyse von Landschaftspflegeheu (2480) (10 K/min, Stickstoffatmosphäre, < 2 mm; Gerät: HP-TGA DMT)**

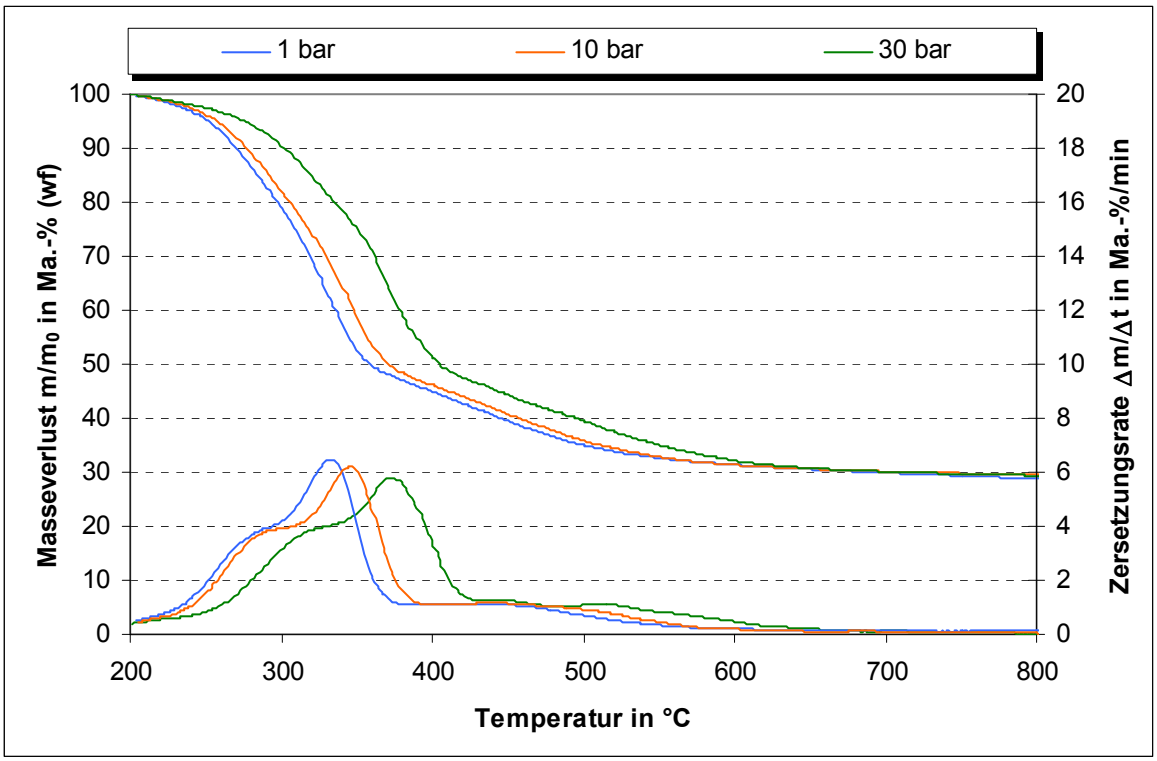


Abb Anhang K - 10: **Ergebnisse der thermogravimetrischen Untersuchungen zum Druckeinfluss auf die Pyrolyse von Roggenganzpflanzensilage (2473) (10 K/min, Stickstoffatmosphäre, < 2 mm; Gerät: HP-TGA DMT)**

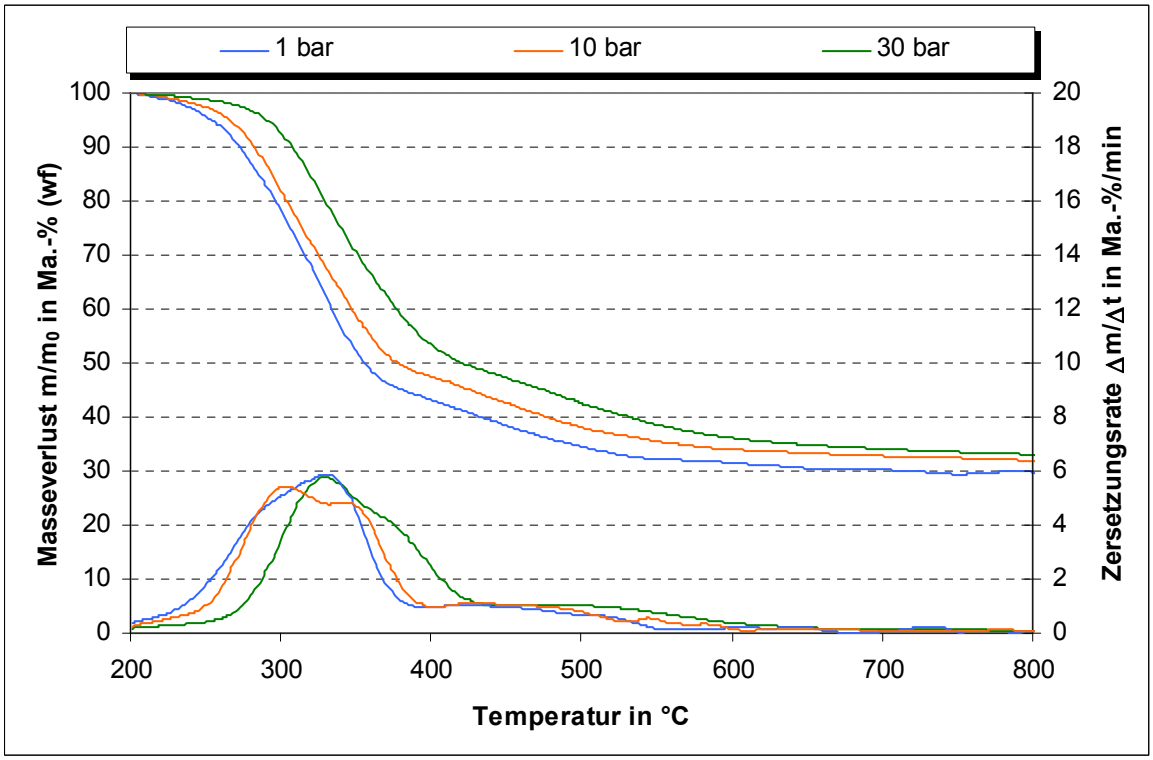


Abb Anhang K - 11: Ergebnisse der thermogravimetrischen Untersuchungen zum Druckeinfluss auf die Pyrolyse von Grünschnittroggensilage (2474) (10 K/min, Stickstoffatmosphäre, < 2 mm; Gerät: HP-TGA DMT)

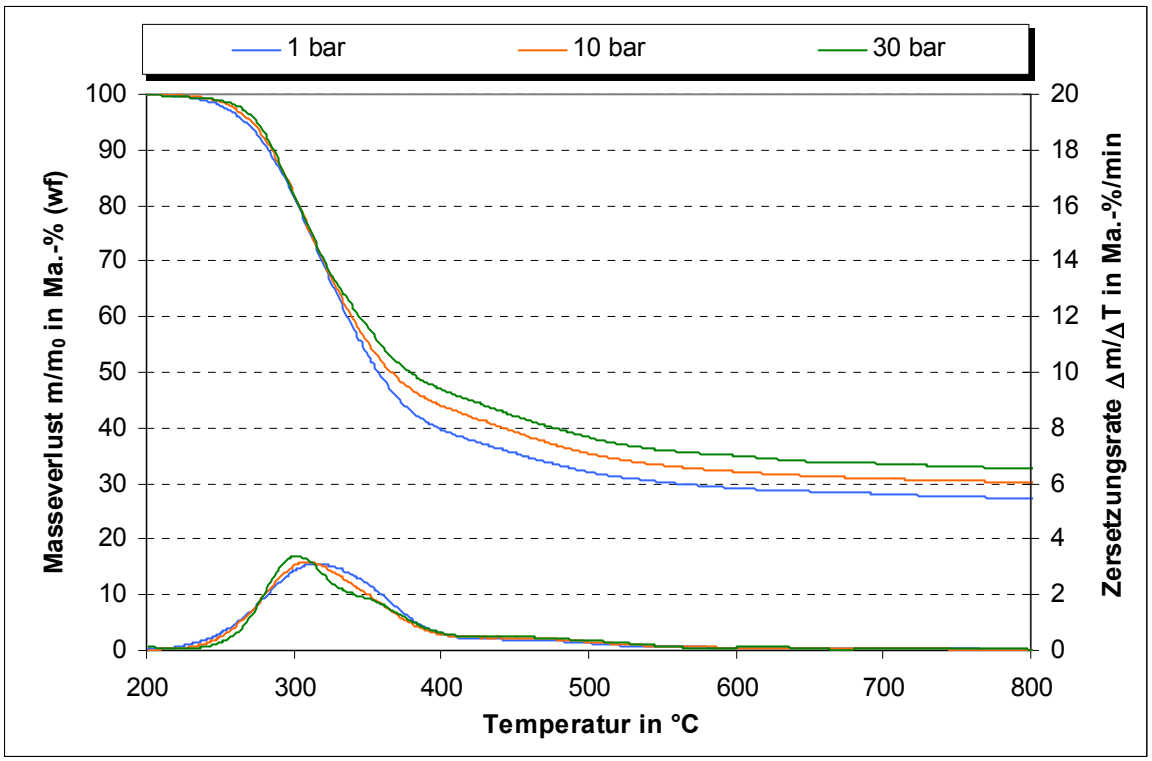


Abb Anhang K - 12: Ergebnisse der thermogravimetrischen Untersuchungen zum Druckeinfluss auf die Pyrolyse von Maissilage (2475) (5 K/min, Stickstoffatmosphäre, < 2 mm; Gerät: HP-TGA DMT)

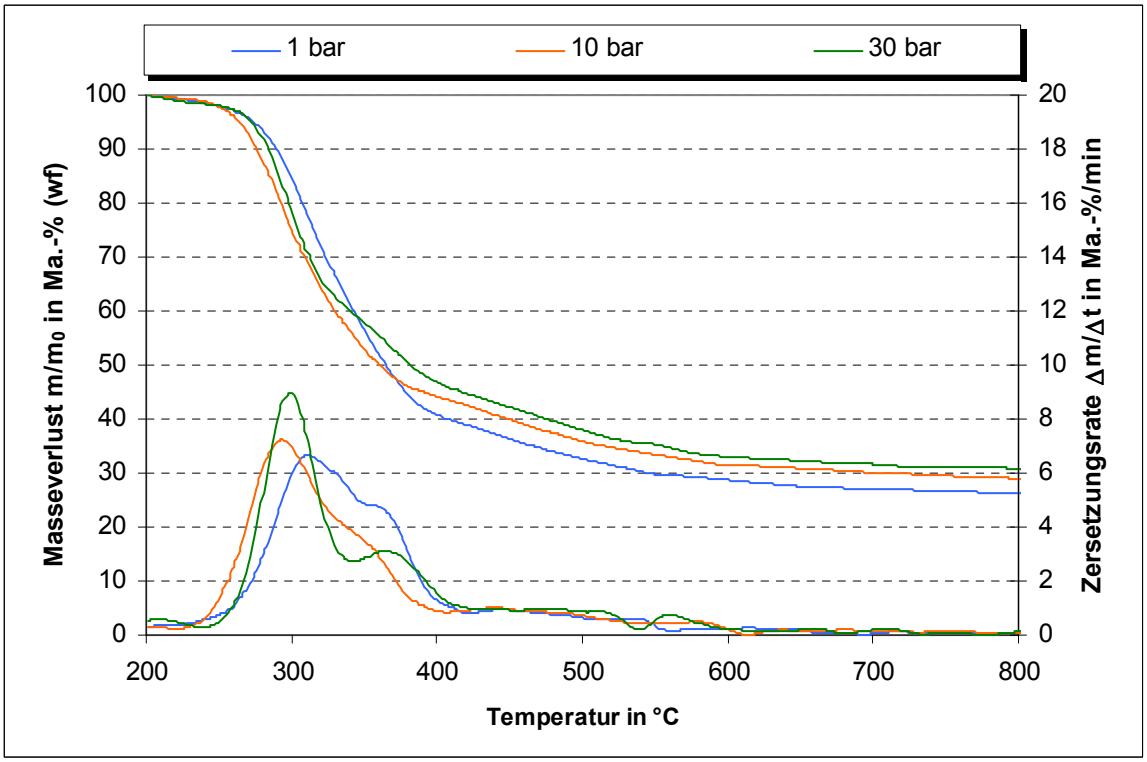


Abb Anhang K - 13: Ergebnisse der thermogravimetrischen Untersuchungen zum Druckeinfluss auf die Pyrolyse von Maissilage (2475) (10 K/min, Stickstoffatmosphäre, < 2 mm; Gerät: HP-TGA DMT)

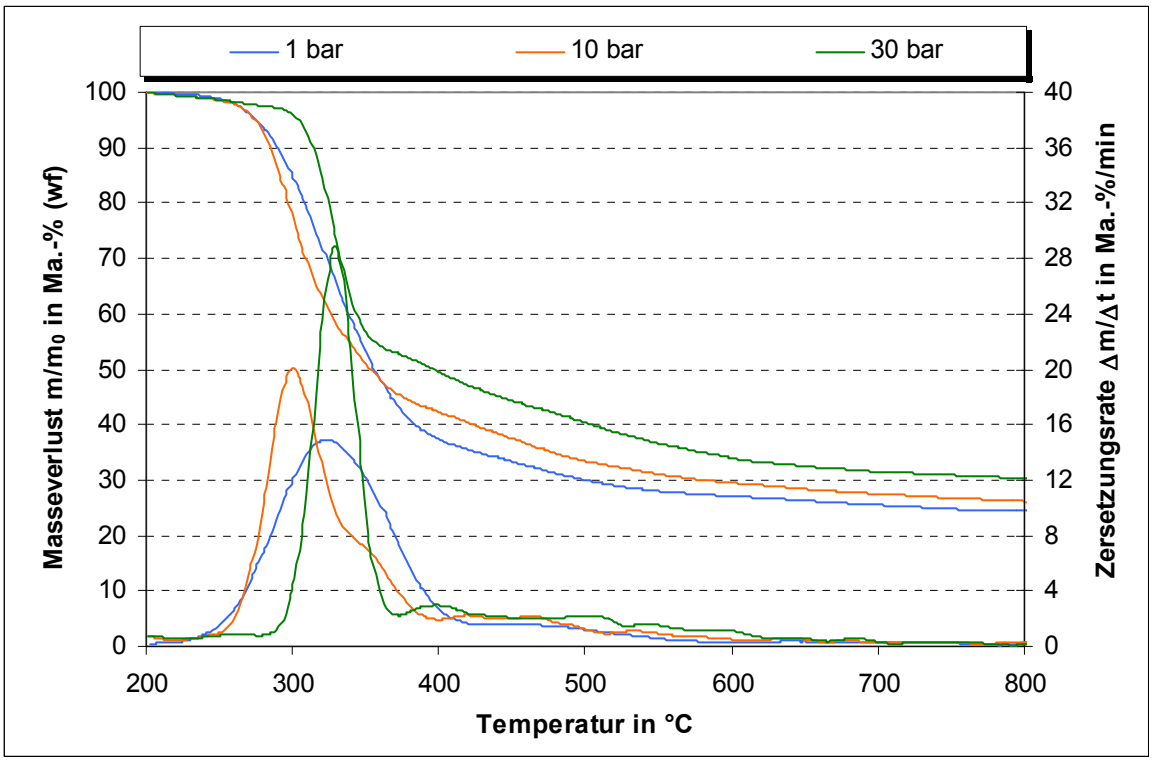


Abb Anhang K - 14: Ergebnisse der thermogravimetrischen Untersuchungen zum Druckeinfluss auf die Pyrolyse von Maissilage (2475) (20 K/min, Stickstoffatmosphäre, < 2 mm; Gerät: HP-TGA DMT)

Tab Anhang K - 2: Ergebnisse der thermogravimetrischen Untersuchungen zum Einfluss von Druck und Aufheizgeschwindigkeit auf die Pyrolyse von Maissilage (2475) (Stickstoffatmosphäre, < 2 mm; Gerät: HP-TGA DMT)

Aufheizrate	in K/min	5			10			20		
Druck	in bar	1	10	30	1	10	30	1	10	30
max. Zersetzungsrate	in Ma.-%/min	3,1	3,2	3,4	6,7	7,2	9,0	14,9	20,1	28,9
Temperatur bei r_{max}	in °C	316	309	302	312	294	299	324	301	329
m/m_0 bei 1000 °C	in Ma.-%	26,5	29,7	31,4	24,8	27,3	30,6	23,8	24,4	29,1
m/m_0 bei 800 °C	in Ma.-%	27,3	30,3	32,6	26,2	29,0	30,9	24,4	26,2	30,4
m/m_0 bei 700 °C	in Ma.-%	28,1	30,9	33,6	27,1	30,1	31,6	25,5	27,5	31,5
m/m_0 bei 600 °C	in Ma.-%	29,2	32,1	35,0	28,7	31,5	33,0	27,1	29,5	34,0
m/m_0 bei 500 °C	in Ma.-%	32,1	35,4	38,4	32,6	36,0	38,0	30,0	33,4	40,3
m/m_0 bei 400 °C	in Ma.-%	39,9	44,1	47,0	41,0	44,2	47,0	37,4	42,3	49,6
m/m_0 bei 300 °C	in Ma.-%	82,0	82,3	82,5	85,2	75,7	79,4	85,4	78,3	96,0

Tab Anhang K - 3: Ergebnisse der thermogravimetrischen Untersuchungen zum Druckeinfluss auf die Pyrolyse von verschiedenen Hölzern (10 K/min, Stickstoffatmosphäre, < 2 mm; Gerät: HP-TGA DMT)

Rohstoff		Waldrestholz (Fichte mit Rinde)			Sägerestholz (Fichte, rindenfrei)			Sägerestholz (Buche, rindenfrei)		
AHG	in K/min	10			10			10		
Druck	in bar	1	10	30	1	10	30	1	10	30
max. Zersetzungsrate	in Ma.-%/min	8,8	7,2	6,7	7,8	7,6	7,3	6,6	6,6	6,1
Temperatur bei r_{max}	in °C	324	328	359	349	359	382	340	364	392
m/m_0 bei 1000 °C	in Ma.-%	26,4	29,1	31,1	23,3	27,4	28,5	21,0	24,7	26,5
m/m_0 bei 800 °C	in Ma.-%	27,4	30,3	31,1	24,2	28,1	29,4	22,4	25,7	26,3
m/m_0 bei 700 °C	in Ma.-%	28,7	31,6	32,1	25,2	29,2	30,7	23,5	27,0	27,1
m/m_0 bei 600 °C	in Ma.-%	31,0	34,0	34,6	27,2	31,5	33,6	25,1	28,8	29,8
m/m_0 bei 500 °C	in Ma.-%	35,9	38,7	41,2	31,1	35,8	40,4	28,3	33,0	34,9
m/m_0 bei 400 °C	in Ma.-%	56,1	55,0	74,9	39,0	46,0	72,3	36,4	54,0	70,6
m/m_0 bei 300 °C	in Ma.-%	93,9	93,9	97,7	93,7	96,2	98,5	92,6	95,7	98,4

Tab Anhang K - 4: Ergebnisse der thermogravimetrischen Untersuchungen zum Druckeinfluss auf die Pyrolyse von verschiedenen Strohsorten (10 K/min, Stickstoffatmosphäre, < 2 mm; Gerät: HP-TGA DMT)

Rohstoff		Weizenstroh			Weizenstroh, grau			Rapsstroh		
AHG	in K/min	10			10			10		
Druck	in bar	1	10	30	1	10	30	1	10	30
max. Zersetzungsrate	in Ma.-%/min	6,5	6,8	6,7	9,4	9,4	8,9	9,6	6,4	7,7
Temperatur bei r_{max}	in °C	396	387	421	371	378	414	378	393	422
m/m_0 bei 1000 °C	in Ma.-%	32,8	31,3	30,3	26,4	22,9	29,5	23,1	26,6	29,4
m/m_0 bei 800 °C	in Ma.-%	32,8	32,4	32,6	28,4	24,3	29,4	26,6	28,5	29,6
m/m_0 bei 700 °C	in Ma.-%	33,4	33,3	34,0	29,7	26,5	30,8	29,6	30,2	30,5
m/m_0 bei 600 °C	in Ma.-%	34,3	34,7	35,5	31,1	27,8	32,1	31,4	31,7	32,4
m/m_0 bei 500 °C	in Ma.-%	36,9	38,6	41,3	34,3	33,1	36,7	34,5	36,1	38,4
m/m_0 bei 400 °C	in Ma.-%	44,1	46,5	50,7	42,1	41,7	49,2	42,1	47,5	55,7
m/m_0 bei 300 °C	in Ma.-%	84,6	83,7	95,0	88,9	92,2	96,4	84,9	89,6	94,2

Tab Anhang K - 5: Ergebnisse der thermogravimetrischen Untersuchungen zum Druckeinfluss auf die Pyrolyse von Pappel (Kurzumtrieb, 2469), Lanschaftspflegeheu (2480) und Triticale-Ganzpflanze (2471) (10 K/min, Stickstoffatmosphäre, < 2 mm; Gerät: HP-TGA DMT)

Rohstoff		Pappel (Kurzumtrieb)			Landschafts-pflegeheu			Triticale-Ganzpflanze		
AHG	in K/min	10			10			10		
Druck	in bar	1	10	30	1	10	30	1	10	30
max. Zersetzungsrate	in Ma.-%/min	8,4	8,4	7,8	5,9	5,5	5,1	7,7	9,3	11,0
Temperatur bei r_{max}	in °C	373	394	413	340	357	384	309	317	335
m/m_0 bei 1000 °C	in Ma.-%	19,6	24,2	26,5	30,3	33,8	31,8	27,0	29,2	30,8
m/m_0 bei 800 °C	in Ma.-%	22,9	25,5	26,3	31,8	34,4	32,8	28,1	28,7	30,4
m/m_0 bei 700 °C	in Ma.-%	24,4	26,8	27,0	32,9	35,4	34,4	29,2	28,7	30,8
m/m_0 bei 600 °C	in Ma.-%	26,3	28,8	30,1	34,4	36,9	36,7	30,6	29,6	32,5
m/m_0 bei 500 °C	in Ma.-%	29,9	33,2	35,0	37,9	41,5	43,5	33,6	33,3	37,7
m/m_0 bei 400 °C	in Ma.-%	38,2	50,1	65,0	46,6	50,3	57,5	41,5	41,0	49,4
m/m_0 bei 300 °C	in Ma.-%	88,9	93,4	95,5	84,1	89,6	94,4	85,3	92,6	97,7

Tab Anhang K - 6: Ergebnisse der thermogravimetrischen Untersuchungen zum Druckeinfluss auf die Pyrolyse von Grünschnittroggen- und Roggenganzpflanzensilage (10 K/min, Stickstoffatmosphäre, < 2 mm; Gerät: HP-TGA DMT)

Rohstoff		Roggenganzpflanzensilage			Grünschnittroggensilage		
AHG	in K/min	10			10		
Druck	in bar	1	10	30	1	10	30
max. Zersetzungsrate	in Ma.-%/min	6,5	6,2	5,8	5,9	5,4	5,8
Temperatur bei r_{max}	in °C	333	346	373	331	303	329
m/m_0 bei 1000 °C	in Ma.-%	26,1	28,8	29,6	28,2	31,7	32,1
m/m_0 bei 800 °C	in Ma.-%	28,8	29,5	29,4	29,8	32,0	33,1
m/m_0 bei 700 °C	in Ma.-%	29,9	30,1	30,1	30,2	32,8	34,1
m/m_0 bei 600 °C	in Ma.-%	31,4	31,4	32,2	31,5	34,0	36,2
m/m_0 bei 500 °C	in Ma.-%	35,1	35,9	39,7	34,6	38,1	42,7
m/m_0 bei 400 °C	in Ma.-%	45,0	46,1	51,7	43,3	47,5	53,5
m/m_0 bei 300 °C	in Ma.-%	79,4	82,1	90,5	78,4	82,6	93,1

Anhang L Datenbank

Zusammensetzung der Pyrolyseprodukte

		Koks			Kondensat, gesamt		
		Ma.-% an	Ma.-% wf	Ma.-% waf	Ma.-% an	Ma.-% wf	Ma.-% waf
Immediatanalyse:	Asche		14,47			0,00	
	Flüchtige		17,00			100,00	
	Fixer Kohlenstoff		68,53			0,00	
	Summe		100,00			100,00	
Elementaranalyse:	Kohlenstoff		72,21			34,33	
	Wasserstoff		3,06			9,53	
	Stickstoff		1,83			0,93	
	Gesamtschwefel						
	Ascheschwefel						
	Verbrennungsschwefel		0,21			0,09	
	Sauerstoff		8,23			55,12	
	Summe		100,00			100,00	
	Brennwert kJ/kg		27.339			16.020	
	Heizwert kJ/kg		26.671			13.966	

Abb Anhang L - 1: Ausschnitt aus der Registerkarte „Produktzusammensetzung“ in der Datenbank „Biomassepyrolyse“

Pyrolysegaszusammensetzung und -ausbeuten

	Vol.-%	l/kg
Wasserstoff H2	1,50	1,79
Methan CH4	6,67	7,93
Kohlenstoffmonoxid CO	35,58	42,34
Kohlenstoffdioxid CO2	52,93	63,00
Ethin C2H2	0,00	0,00
Schwefelwasserstoff H2S	0,05	0,06
Carbonylsulfid COS	0,01	0,01
Propin C3H4	0,08	0,10
Ethan C2H6	1,54	1,83
Ethen C2H4	0,95	1,13
Propan C3H8	0,30	0,36
Propen C3H6	0,35	0,41
i-Butan C4H10	0,01	0,02
N-Butan C4H10	0,03	0,03
Summe	100,00	119,01

Energiegehalte

Gasdichte	1,590	m³/kg
Gasausbeute	119,01	l/kg
Brennwert	6.052	kJ/kg
Brennwert	3.807	kJ/m³
Heizwert	5.865	kJ/kg
Heizwert Gas	3.689	kJ/m³

Abb Anhang L - 2: Ausschnitt aus der Registerkarte „Pyrolysegaszusammensetzung und -ausbeuten“ in der Datenbank „Biomassepyrolyse“

Anhang M Ergebnisse der Modellierung mit AspenPlus™

Tab Anhang M - 1: Ergebnisse der Modellierung (Teil 1) der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei verschiedenen Temperaturen

Temperatur	°C	308	316	356	380	403	419	468	506	553	600	653	704	750
Aufheizrate	K/min	40	43	45	38	53	67	77	74	82	94	104	109	109
Input Einsatzstoff	kg/s	0,6183	0,6183	0,6183	0,6183	0,6183	0,6183	0,6183	0,6183	0,6183	0,6183	0,6183	0,6183	0,6183
Brennstoffwärmeleistung	MW	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Pyrolysegas														
Mengenstrom	kg/s	0,0235	0,0348	0,0437	0,0570	0,0635	0,0644	0,0676	0,0738	0,0769	0,0854	0,1002	0,0954	0,1121
Wärmestrom (chemisch)	MW	0,0618	0,1007	0,1457	0,2263	0,2861	0,3506	0,4472	0,5192	0,5858	0,7828	0,9455	1,0366	1,2299
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,0090	0,0095	0,0105	0,0113	0,0121	0,0128	0,0144	0,0158	0,0175	0,0193	0,0212	0,0231	0,0249
Pyrolyseöl														
Mengenstrom	kg/s	0,0386	0,0536	0,1252	0,1708	0,1895	0,2108	0,2251	0,2277	0,2328	0,2285	0,2275	0,2212	0,1965
Wärmestrom (chemisch)	MW	1,0595	1,3775	3,2200	4,0870	4,7289	5,7791	5,5962	5,8051	5,8279	5,7562	5,5816	5,5137	5,0197
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,0406	0,0430	0,0484	0,0528	0,0570	0,0602	0,0697	0,0775	0,0876	0,0980	0,1104	0,1229	0,1346
Pyrolysekoks														
Mengenstrom	kg/s	0,4364	0,4043	0,2894	0,2153	0,1782	0,1618	0,1457	0,1377	0,1279	0,1196	0,1110	0,1143	0,1166
Wärmestrom (chemisch)	MW	9,2230	8,7904	7,0843	6,0079	5,1406	4,7128	4,3517	4,1747	4,0241	3,8883	3,6725	3,8448	3,8806
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,2050	0,2108	0,2555	0,2538	0,2553	0,2640	0,2923	0,3190	0,3476	0,3732	0,4039	0,4316	0,4600
Zersetzungswasser														
Mengenstrom	kg/s	0,0457	0,0515	0,0859	0,1011	0,1130	0,1072	0,1057	0,1049	0,1065	0,1106	0,1053	0,1133	0,1189
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,1932	0,1949	0,1987	0,2017	0,2046	0,2067	0,2128	0,2178	0,2239	0,2302	0,2373	0,2444	0,2509
Gutfeuchte														
Mengenstrom	kg/s	0,0742	0,0742	0,0742	0,0742	0,0742	0,0742	0,0742	0,0742	0,0742	0,0742	0,0742	0,0742	0,0742
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,2440	0,2463	0,2287	0,2324	0,2359	0,2384	0,2460	0,2520	0,2595	0,2671	0,2758	0,2844	0,2923
Summe Produkte														
chem. gebundene Wärme	MW	10,3443	10,2686	10,4500	10,3213	10,1556	10,8426	10,3950	10,4990	10,4378	10,4273	10,1997	10,3951	10,1302
Fühlbare Wärme	MW	0,6918	0,7046	0,7418	0,7520	0,7650	0,7820	0,8352	0,8821	0,9361	0,9877	1,0486	1,1065	1,1627

Tab Anhang M - 2: Ergebnisse der Modellierung (Teil 2) der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei verschiedenen Temperaturen

Temperatur	°C	308	316	356	380	403	419	468	506	553	600	653	704	750
Aufheizrate	K/min	40	43	45	38	53	67	77	74	82	94	104	109	109
Input Ensatzstoff	kg/s	0,6183	0,6183	0,6183	0,6183	0,6183	0,6183	0,6183	0,6183	0,6183	0,6183	0,6183	0,6183	0,6183
Brennstoffwärmeleistung	MW	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Beheizung														
Q1	MW	0,3298	0,3298	0,3035	0,3035	0,3035	0,3035	0,3035	0,3035	0,3035	0,3035	0,3035	0,3035	0,3035
Q2	MW	0,1815	0,1981	0,2242	0,2526	0,2798	0,2997	0,3596	0,4082	0,4697	0,5328	0,6065	0,6803	0,7485
Q3	MW	0,0251	0,0274	0,0295	0,0332	0,0367	0,0392	0,0467	0,0527	0,0602	0,0678	0,0766	0,0852	0,0930
Summe	MW	0,5363	0,5553	0,5572	0,5893	0,6200	0,6424	0,7099	0,7644	0,8334	0,9041	0,9866	1,0689	1,1450
Zerlegungs-/Bildungswärmen														
Q-decomb	MW	3,0448	3,0448	3,0448	3,0448	3,0448	3,0448	3,0448	3,0448	3,0448	3,0448	3,0448	3,0448	3,0448
Q-Gas	MW	0,0765	0,0812	0,0882	0,0970	0,0945	0,1034	0,1076	0,1082	0,1105	0,1110	0,1106	0,1085	0,1087
Q-Öl	MW	0,5061	0,5130	0,5671	0,5964	0,6348	0,6526	0,7275	0,7908	0,8701	0,9527	1,0503	1,1491	1,2384
Q-ZW	MW	0,8272	0,8274	0,8286	0,8294	0,8300	0,8305	0,8318	0,8329	0,8341	0,8352	0,8365	0,8377	0,8387
Q-Koks	MW	1,6136	1,5166	1,2474	0,8508	1,0001	0,6480	0,4714	0,3848	0,3337	0,0951	0,0179	-0,0908	0,0022
Summe			2,9383	2,7313	2,3736	2,5595	2,2346	2,1383	2,1167	2,1483	1,9940	2,0152	2,0045	2,1880
Input	MW	13,5812	13,6001	13,6020	13,6341	13,6648	13,6872	13,7547	13,8092	13,8782	13,9490	14,0314	14,1138	14,1899
Output	MW	14,0595	13,9114	13,9231	13,4469	13,4801	13,8591	13,3685	13,4977	13,5222	13,4091	13,2635	13,5061	13,4809
Differenz Output-Input	MW	0,4783	0,3113	0,3211	-0,1872	-0,1847	0,1719	-0,3862	-0,3115	-0,3560	-0,5399	-0,7679	-0,6077	-0,7090
Pyrolysewärme (chem.)	MW	0,3443	0,2686	0,4500	0,3213	0,1556	0,8426	0,3950	0,4990	0,4378	0,4273	0,1997	0,3951	0,1302

Tab Anhang M - 3: Ergebnisse der Modellierung der Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) bei verschiedenen Temperaturen

Temperatur	**°C**	**318**	**335**	**401**	**422**	**504**	**603**	**702**
Aufheizrate	K/min	42	38	69	54	72	99	120
Input Einsatzstoff	kg/s	0,5962	0,5962	0,5962	0,5962	0,5962	0,5962	0,5962
Brennstoffwärmeleistung	MW	10	10	10	10	10	10	10
Pyrolysegas								
Mengenstrom	kg/s	0,0312	0,0443	0,0541	0,0714	0,0837	0,1026	0,1078
Wärmestrom (chemisch)	MW	0,0727	0,1191	0,2099	0,2970	0,4833	0,8058	0,9861
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,0091	0,0097	0,0119	0,0128	0,0158	0,0193	0,0230
Pyrolyseöl								
Mengenstrom	kg/s	0,0594	0,0978	0,1529	0,1721	0,1787	0,1751	0,1780
Wärmestrom (chemisch)	MW	1,4142	2,4635	3,4573	4,2198	4,3468	4,3068	4,4608
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,0416	0,0447	0,0563	0,0607	0,0774	0,0988	0,1224
Pyrolysekoks								
Mengenstrom	kg/s	0,3718	0,3065	0,2224	0,1956	0,1666	0,1491	0,1397
Wärmestrom (chemisch)	MW	8,4401	7,3942	6,0715	5,4105	4,9065	4,6081	4,3712
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,2129	0,2185	0,2412	0,2501	0,2990	0,3504	0,4115
Zersetzungswasser								
Mengenstrom	kg/s	0,0622	0,0760	0,0953	0,0856	0,0957	0,0978	0,0991
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,1939	0,1962	0,2041	0,2070	0,2177	0,2306	0,2441
Gutfeuchte								
Mengenstrom	kg/s	0,0715	0,0715	0,0715	0,0715	0,0715	0,0715	0,0715
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,2149	0,2175	0,2269	0,2303	0,2429	0,2580	0,2739
Summe Produkte								
chem. gebundene Wärme	MW	9,9271	9,9767	9,7387	9,9274	9,7366	9,7207	9,8181
Fühlbare Wärme	MW	0,6726	0,6866	0,7404	0,7609	0,8528	0,9572	1,0749
Beheizung								
Q1	MW	0,2909	0,2909	0,2909	0,2909	0,2909	0,2909	0,2909
Q2	MW	0,1687	0,1881	0,2592	0,2855	0,3850	0,5087	0,6420
Q3	MW	0,0228	0,0254	0,0348	0,0382	0,0508	0,0659	0,0818
Summe	MW	0,4824	0,5044	0,5849	0,6145	0,7266	0,8655	1,0146
Zerlegungs-/Bildungswärmen								
Q-decomb	MW	2,6033	2,6033	2,6033	2,6033	2,6033	2,6033	2,6033
Q-Gas	MW	0,0701	0,0767	0,0844	0,0884	0,1006	0,1086	0,1109
Q-Öl	MW	0,4973	0,5166	0,6037	0,6345	0,7547	0,9098	1,0831
Q-ZW	MW	0,8275	0,8280	0,8299	0,8306	0,8328	0,8353	0,8376
Q-Koks	MW	1,2662	1,1314	0,7218	0,3359	0,3641	0,0968	-0,0798
Summe								
Input	MW	13,0857	13,1077	13,1882	13,2178	13,3299	13,4688	13,6179
Output	MW	13,2608	13,2161	12,7189	12,5776	12,6415	12,6283	12,8448
Differenz Output-Input	MW	0,1751	0,1085	-0,4693	-0,6401	-0,6884	-0,8404	-0,7731
Pyrolysewärme (chem.)	MW	-0,0729	-0,0233	-0,2613	-0,0726	-0,2634	-0,2793	-0,1819

Tab Anhang M - 4: Ergebnisse der Modellierung der Pyrolyse von Pappel (Kurzumtrieb, 2469) bei verschiedenen Temperaturen

Temperatur	°C	**320**	**409**	**498**	**608**	**702**
Aufheizrate	K/min	56	75	99	133	145
Input Einsatzstoff	kg/s	0,6239	0,6239	0,6239	0,6239	0,6239
Brennstoffwärmeleistung	MW	10	10	10	10	10
Pyrolysegas						
Mengenstrom	kg/s	0,0248	0,0788	0,0875	0,1052	0,1129
Wärmestrom (chemisch)	MW	0,0567	0,2900	0,4263	0,8217	1,0120
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,0092	0,0123	0,0155	0,0195	0,0231
Pyrolyseöl						
Mengenstrom	kg/s	0,0749	0,1695	0,2274	0,2108	0,2184
Wärmestrom (chemisch)	MW	1,7923	4,2374	5,6366	5,3770	5,4839
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,0421	0,0581	0,0759	0,0999	0,1224
Pyrolysekoks						
Mengenstrom	kg/s	0,3963	0,2042	0,1385	0,1306	0,1180
Wärmestrom (chemisch)	MW	8,3014	5,4734	3,9426	3,8812	3,4550
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,2373	0,2631	0,3116	0,3715	0,4332
Zersetzungswasser						
Mengenstrom	kg/s	0,0531	0,0966	0,0956	0,1025	0,0998
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,1942	0,2053	0,2168	0,2313	0,2441
Gutfeuchte						
Mengenstrom	kg/s	0,0749	0,0749	0,0749	0,0749	0,0749
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,2253	0,2389	0,2530	0,2708	0,2866
Summe Produkte						
chem. gebundene Wärme	MW	10,1505	10,0008	10,0055	10,0800	9,9509
Fühlbare Wärme	MW	0,7081	0,7776	0,8728	0,9930	1,1095
Beheizung						
Q1	MW	0,3047	0,3047	0,3047	0,3047	0,3047
Q2	MW	0,1798	0,2830	0,3939	0,5389	0,6715
Q3	MW	0,0243	0,0379	0,0520	0,0698	0,0856
Summe	MW	0,5088	0,6256	0,7505	0,9134	1,0618
Zerlegungs-/Bildungswärmen						
Q-decomb	MW	2,8623	2,8623	2,8623	2,8623	2,8623
Q-Gas	MW	0,0704	0,0843	0,0969	0,1082	0,1109
Q-Öl	MW	0,5281	0,6516	0,7864	0,9666	1,1384
Q-ZW	MW	0,8276	0,8302	0,8326	0,8354	0,8376
Q-Koks	MW	1,5466	0,6679	0,3852	0,0271	0,0691
Summe						
Input	MW	13,3711	13,4879	13,6128	13,7757	13,9241
Output	MW	13,8313	13,0125	12,9794	13,0103	13,2163
Differenz Output-Input	MW	0,4602	-0,4754	-0,6335	-0,7654	-0,7078
Pyrolysewärme (chem.)	MW	0,1505	0,0008	0,0055	0,0800	-0,0491

Tab Anhang M - 5: Ergebnisse der Modellierung (Teil 1) der Pyrolyse von Weizenstroh (2275) bei verschiedenen Temperaturen

Temperatur	°C	284	312	326	406	460	508	552	602	650	700	750
Aufheizrate	K/min	34	44	46	65	82	80	90	98	114	116	74
Input Einsatzstoff	kg/s	0,6795	0,6795	0,6795	0,6795	0,6795	0,6795	0,6795	0,6795	0,6795	0,6795	0,6795
Brennstoffwärmeleistung	MW	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Pyrolysegas												
Mengenstrom	kg/s	0,0552	0,0827	0,0831	0,1126	0,1206	0,1205	0,1244	0,1330	0,1277	0,1346	0,1447
Wärmestrom (chemisch)	MW	0,2169	0,2394	0,2938	0,3735	0,5169	0,5741	0,7024	0,8586	0,9091	0,9774	1,2203
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,0081	0,0090	0,0095	0,0122	0,0141	0,0159	0,0174	0,0193	0,0211	0,0230	0,0249
Pyrolyseöl												
Mengenstrom	kg/s	0,0634	0,1247	0,1351	0,1673	0,1507	0,1625	0,1624	0,1608	0,1687	0,1657	0,1454
Wärmestrom (chemisch)	MW	1,8804	3,3977	3,6810	3,9293	4,0963	3,8205	4,4704	4,5256	4,7602	4,6513	4,0611
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,0359	0,0406	0,0430	0,0575	0,0681	0,0780	0,0873	0,0986	0,1098	0,1219	0,1345
Pyrolysekoks												
Mengenstrom	kg/s	0,4074	0,2817	0,2638	0,2197	0,2009	0,1940	0,1872	0,1807	0,1769	0,1734	0,1844
Wärmestrom (chemisch)	MW	8,0655	6,4568	6,1999	5,2286	4,7719	4,6754	4,5958	4,4817	4,3401	4,2928	4,4453
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,2083	0,2050	0,2108	0,2597	0,2940	0,3286	0,3494	0,3837	0,4225	0,4556	0,4883
Zersetzungswasser												
Mengenstrom	kg/s	0,0720	0,1088	0,1160	0,0984	0,1257	0,1210	0,1240	0,1235	0,1246	0,1243	0,1235
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,1898	0,1932	0,1949	0,2049	0,2118	0,2180	0,2238	0,2305	0,2370	0,2438	0,2508
Gutfeuchte												
Mengenstrom	kg/s	0,0815	0,0815	0,0815	0,0815	0,0815	0,0815	0,0815	0,0815	0,0815	0,0815	0,0815
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,2394	0,2440	0,2463	0,2597	0,2689	0,2773	0,2849	0,2940	0,3026	0,3117	0,3211
Summe Produkte												
chem. gebundene Wärme	MW	10,1628	10,0940	10,1746	9,5314	9,3850	9,0701	9,7686	9,8659	10,0094	9,9215	9,7267
Fühlbare Wärme	MW	0,6816	0,6918	0,7046	0,7940	0,8570	0,9177	0,9629	1,0260	1,0930	1,1560	1,2195

Tab Anhang M - 6: Ergebnisse der Modellierung (Teil 2) der Pyrolyse von Weizenstroh (2275) bei verschiedenen Temperaturen

Temperatur	°C	284	312	326	406	460	508	552	602	650	700	750
Aufheizrate	K/min	34	44	46	65	82	80	90	98	114	116	74
Input Ensatzstoff	kg/s	0,6795	0,6795	0,6795	0,6795	0,6795	0,6795	0,6795	0,6795	0,6795	0,6795	0,6795
Brennstoffwärmeleistung	MW	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Beheizung												
Q1	MW	0,3298	0,3298	0,3298	0,3298	0,3298	0,3298	0,3298	0,3298	0,3298	0,3298	0,3298
Q2	MW	0,1489	0,1815	0,1981	0,2961	0,3658	0,4294	0,4891	0,5601	0,6293	0,7034	0,7800
Q3	MW	0,0205	0,0251	0,0274	0,0407	0,0500	0,0583	0,0660	0,0750	0,0837	0,0928	0,1021
Summe	MW	0,4992	0,5363	0,5553	0,6666	0,7456	0,8175	0,8849	0,9649	1,0427	1,1260	1,2120
Zerlegungs-/Bildungswärmen												
Q-decomb	MW	2,9439	2,9439	2,9439	2,9439	2,9439	2,9439	2,9439	2,9439	2,9439	2,9439	2,9439
Q-Gas	MW	0,0997	0,0814	0,0925	0,0847	0,0887	0,0908	0,0959	0,0964	0,1008	0,1020	0,1053
Q-Öl	MW	0,4875	0,5496	0,5607	0,7000	0,7889	0,8709	0,9450	1,0391	1,1262	1,2227	1,3207
Q-ZW	MW	0,8264	0,8273	0,8277	0,8301	0,8316	0,8329	0,8340	0,8353	0,8364	0,8376	0,8386
Q-Koks	MW	2,4567	1,0743	-1,5168	-2,2255	-2,7254	-3,1000	11,4535	11,4141	11,2046	11,1874	10,8723
Summe												
Input	MW	13,4431	13,4803	13,4992	13,6105	13,6895	13,7614	13,8288	13,9088	13,9866	14,0699	14,1559
Output	MW	14,7148	13,3184	10,8434	9,7146	9,2259	8,6824	24,0598	24,2768	24,3704	24,4272	24,0831
Differenz Output-Input	MW	1,2717	-0,1618	-2,6558	-3,8960	-4,4636	-5,0791	10,2310	10,3680	10,3838	10,3574	9,9272
Pyrolysewärme (chem.)	MW	0,1628	0,0940	0,1746	-0,4686	-0,6150	-0,9299	-0,2314	-0,1341	0,0094	-0,0785	-0,2733

Tab Anhang M - 7: Ergebnisse der Modellierung der Pyrolyse von Weizenstroh, grau (2297) bei verschiedenen Temperaturen

Temperatur	**°C**	**340**	**408**	**509**	**613**	**705**
Aufheizrate	K/min	48	66	86	104	136
Input Einsatzstoff	kg/s	0,6575	0,6575	0,6575	0,6575	0,6575
Brennstoffwärmeleistung	MW	10	10	10	10	10
Pyrolysegas						
Mengenstrom	kg/s	0,0709	0,0927	0,1126	0,1195	0,1279
Wärmestrom (chemisch)	MW	2,9587	4,4932	4,8150	4,8278	4,8942
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,0100	0,0123	0,0159	0,0197	0,0231
Pyrolyseöl						
Mengenstrom	kg/s	0,1207	0,1627	0,1774	0,1751	0,1772
Wärmestrom (chemisch)	MW	2,9587	4,4932	4,8150	4,8278	4,8942
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,0455	0,0580	0,0781	0,1011	0,1231
Pyrolysekoks						
Mengenstrom	kg/s	0,2897	0,2087	0,1773	0,1672	0,1602
Wärmestrom (chemisch)	MW	0,2695	0,4034	0,7046	0,9319	1,1319
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,2322	0,2557	0,3115	0,3783	0,4425
Zersetzungswasser						
Mengenstrom	kg/s	0,0973	0,1145	0,1112	0,1168	0,1133
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,1967	0,2052	0,2182	0,2320	0,2445
Gutfeuchte						
Mengenstrom	kg/s	0,0789	0,0789	0,0789	0,0789	0,0789
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,2406	0,2517	0,2684	0,2863	0,3025
Summe Produkte						
chem. gebundene Wärme	MW	6,1869	9,3899	10,3345	10,5875	10,9203
Fühlbare Wärme	MW	0,7249	0,7829	0,8921	1,0173	1,1357
Beheizung						
Q1	MW	0,3207	0,3207	0,3207	0,3207	0,3207
Q2	MW	0,2131	0,2962	0,4251	0,5677	0,7005
Q3	MW	0,0287	0,0398	0,0566	0,0745	0,0907
Summe	MW	0,5626	0,6568	0,8024	0,9629	1,1119
Zerlegungs-/Bildungswärmen						
Q-decomb	MW	2,8617	2,8617	2,8617	2,8617	2,8617
Q-Gas	MW	0,0934	0,0949	0,1009	0,1065	0,1093
Q-Öl	MW	0,5684	0,6777	0,8430	1,0260	1,1988
Q-ZW	MW	0,8282	0,8302	0,8329	0,8356	0,8377
Q-Koks	MW	1,1149	0,6652	0,4319	0,2278	0,2118
Summe						
Input	MW	13,4243	13,5184	13,6641	13,8245	13,9735
Output	MW	9,5167	12,4408	13,4353	13,8007	14,4136
Differenz Output-Input	MW	-3,9076	-1,0777	-0,2288	-0,0239	0,4400
Pyrolysewärme (chem.)	MW	-3,8131	-0,6101	0,3345	0,5875	0,9203

Tab Anhang M - 8: Ergebnisse der Modellierung der Pyrolyse von Rapsstroh (2386) bei verschiedenen Temperaturen

Temperatur	**°C**	**333**	**411**	**520**	**607**	**707**
Aufheizrate	K/min	54	67	100	103	141
Input Einsatzstoff	kg/s	0,6837	0,6837	0,6837	0,6837	0,6837
Brennstoffwärmeleistung	MW	10	10	10	10	10
Pyrolysegas						
Mengenstrom	kg/s	0,0518	0,1074	0,1309	0,1491	0,1561
Wärmestrom (chemisch)	MW	0,2781	0,3856	0,5604	0,9054	1,4051
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,0098	0,0124	0,0163	0,0195	0,0232
Pyrolyseöl						
Mengenstrom	kg/s	0,1123	0,1670	0,1803	0,1664	0,1633
Wärmestrom (chemisch)	MW	2,8691	4,3835	4,7952	4,4524	4,5554
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,0442	0,0586	0,0805	0,0998	0,1236
Pyrolysekoks						
Mengenstrom	kg/s	0,3491	0,2155	0,1847	0,1780	0,1651
Wärmestrom (chemisch)	MW	7,1248	5,0175	4,3665	4,2537	3,9229
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,2568	0,2760	0,3533	0,4149	0,4836
Zersetzungswasser						
Mengenstrom	kg/s	0,0884	0,1119	0,1057	0,1082	0,1171
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,1958	0,2056	0,2196	0,2312	0,2447
Gutfeuchte						
Mengenstrom	kg/s	0,0820	0,0820	0,0820	0,0820	0,0820
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,2490	0,2622	0,2811	0,2967	0,3150
Summe Produkte						
chem. gebundene Wärme	MW	10,2719	9,7866	9,7221	9,6116	9,8834
Fühlbare Wärme	MW	0,7556	0,8148	0,9507	1,0620	1,1901
Beheizung						
Q1	MW	0,3311	0,3311	0,3311	0,3311	0,3311
Q2	MW	0,2069	0,3033	0,4456	0,5674	0,7138
Q3	MW	0,0287	0,0419	0,0608	0,0764	0,0947
Summe	MW	0,5667	0,6763	0,8375	0,9749	1,1396
Zerlegungs-/Bildungswärmen						
Q-decomb	MW	2,9557	2,9557	2,9557	2,9557	2,9557
Q-Gas	MW	0,1106	0,0805	0,0842	0,0907	0,1072
Q-Öl	MW	0,5561	0,7153	0,9015	1,0563	1,2335
Q-ZW	MW	0,8279	0,8302	0,8332	0,8354	0,8377
Q-Koks	MW	1,5294	0,6762	0,3898	0,2541	0,2222
Summe						
Input	MW	13,5224	13,6320	13,7932	13,9306	14,0952
Output	MW	14,0517	12,9037	12,8814	12,9101	13,4741
Differenz Output-Input	MW	0,5293	-0,7283	-0,9118	-1,0205	-0,6212
Pyrolysewärme (chem.)	MW	0,2719	-0,2134	-0,2779	-0,3884	-0,1166

Tab Anhang M - 9: Ergebnisse der Modellierung der Pyrolyse von Landschaftspflegeheu (2480) bei verschiedenen Temperaturen

Temperatur	**°C**	**303**	**398**	**500**	**600**	**700**
Aufheizrate	K/min	47	63	77	107	126
Input Einsatzstoff	kg/s	0,6698	0,6698	0,6698	0,6698	0,6698
Brennstoffwärmeleistung	MW	10	10	10	10	10
Pyrolysegas						
Mengenstrom	kg/s	0,0503	0,0879	0,1052	0,1213	0,1327
Wärmestrom (chemisch)	MW	0,1162	0,2432	0,4315	0,7408	0,9946
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,0086	0,0119	0,0156	0,0192	0,0230
Pyrolyseöl						
Mengenstrom	kg/s	0,0860	0,1462	0,1615	0,1469	0,1392
Wärmestrom (chemisch)	MW	2,1925	4,0031	4,5141	4,1273	3,9226
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,0391	0,0561	0,0763	0,0982	0,1220
Pyrolysekoks						
Mengenstrom	kg/s	0,3621	0,2361	0,1898	0,1833	0,1761
Wärmestrom (chemisch)	MW	7,6530	5,4040	4,3361	4,2354	4,1106
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,2136	0,2541	0,3103	0,3744	0,4381
Zersetzungswasser						
Mengenstrom	kg/s	0,0910	0,1192	0,1328	0,1379	0,1415
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,1921	0,2040	0,2170	0,2303	0,2439
Gutfeuchte						
Mengenstrom	kg/s	0,0804	0,0804	0,0804	0,0804	0,0804
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,2391	0,2547	0,2720	0,2894	0,3074
Summe Produkte						
chem. gebundene Wärme	MW	9,9617	9,6503	9,2817	9,1035	9,0278
Fühlbare Wärme	MW	0,6927	0,7809	0,8912	1,0115	1,1343
Beheizung						
Q1	MW	0,3264	0,3264	0,3264	0,3264	0,3264
Q2	MW	0,1707	0,2860	0,4177	0,5556	0,7017
Q3	MW	0,0233	0,0389	0,0562	0,0736	0,0916
Summe	MW	0,5203	0,6513	0,8002	0,9556	1,1196
Zerlegungs-/Bildungswärmen						
Q-decomb	MW	2,8941	2,8941	2,8941	2,8941	2,8941
Q-Gas	MW	0,0707	0,0757	0,0841	0,0940	0,1009
Q-Öl	MW	0,5414	0,6905	0,8573	1,0305	1,2165
Q-ZW	MW	0,8270	0,8299	0,8327	0,8352	0,8376
Q-Koks	MW	1,2136	0,6526	0,3834	0,1795	0,0278
Summe						
Input	MW	13,4145	13,5454	13,6944	13,8497	14,0137
Output	MW	13,3071	12,6799	12,3305	12,2543	12,3449
Differenz Output-Input	MW	-0,1074	-0,8655	-1,3639	-1,5955	-1,6689
Pyrolysewärme (chem.)	MW	-0,0383	-0,3497	-0,7183	-0,8965	-0,9722

Tab Anhang M - 10: Ergebnisse der Modellierung der Pyrolyse von Triticale-Ganzpflanze (2471) bei verschiedenen Temperaturen

Temperatur	**°C**	**307**	**353**	**404**	**500**	**602**	**705**
Aufheizrate	K/min	47	60	60	77	94	117
Input Einsatzstoff	kg/s	0,6703	0,6703	0,6703	0,6703	0,6703	0,6703
Brennstoffwärmeleistung	MW	10	10	10	10	10	10
Pyrolysegas							
Mengenstrom	kg/s	0,0550	0,0662	0,0873	0,1054	0,1256	0,1317
Wärmestrom (chemisch)	MW	0,1831	0,2148	0,3137	0,5062	0,8220	1,0312
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,0088	0,0104	0,0122	0,0156	0,0193	0,0231
Pyrolyseöl							
Mengenstrom	kg/s	0,1106	0,1521	0,1781	0,1944	0,1889	0,1647
Wärmestrom (chemisch)	MW	2,7725	3,7218	4,5393	5,2169	5,0214	4,5294
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,0399	0,0478	0,0572	0,0763	0,0985	0,1231
Pyrolysekoks							
Mengenstrom	kg/s	0,3224	0,2544	0,1984	0,1641	0,1506	0,1596
Wärmestrom (chemisch)	MW	7,1383	6,7500	5,1226	4,3653	4,0792	4,4356
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,2258	0,2491	0,2619	0,3214	0,3878	0,4576
Zersetzungswasser							
Mengenstrom	kg/s	0,1019	0,1172	0,1260	0,1259	0,1247	0,1338
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,1927	0,1983	0,2047	0,2170	0,2304	0,2445
Gutfeuchte							
Mengenstrom	kg/s	0,0804	0,0804	0,0804	0,0804	0,0804	0,0804
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,2400	0,2474	0,2558	0,2721	0,2899	0,3084
Summe Produkte							
chem. gebundene Wärme	MW	10,0939	10,6865	9,9756	10,0883	9,9227	9,9962
Fühlbare Wärme	MW	0,7071	0,7530	0,7918	0,9024	1,0258	1,1567
Beheizung							
Q1	MW	0,3278	0,3278	0,3278	0,3278	0,3278	0,3278
Q2	MW	0,1793	0,2346	0,2986	0,4252	0,5676	0,7207
Q3	MW	0,0240	0,0314	0,0399	0,0561	0,0739	0,0924
Summe	MW	0,5311	0,5939	0,6663	0,8092	0,9693	1,1410
Zerlegungs-/Bildungswärmen							
Q-decomb	MW	3,1692	3,1692	3,1692	3,1692	3,1692	3,1692
Q-Gas	MW	0,0901	0,0892	0,0908	0,0955	0,1022	0,1071
Q-Öl	MW	0,5347	0,6094	0,6935	0,8567	1,0385	1,2352
Q-ZW	MW	0,8272	0,8285	0,8300	0,8327	0,8353	0,8377
Q-Koks	MW	1,2874	-0,0909	0,5879	0,3146	0,1124	-0,0670
Summe							
Input	MW	13,7003	13,7631	13,8356	13,9784	14,1386	14,3102
Output	MW	13,5403	12,8758	12,9696	13,0902	13,0369	13,2659
Differenz Output-Input	MW	-0,1600	-0,8873	-0,8660	-0,8882	-1,1017	-1,0443
Pyrolysewärme (chem.)	MW	0,0939	0,6865	-0,0244	0,0883	-0,0773	-0,0038

Tab Anhang M - 11: Ergebnisse der Modellierung (1) der Pyrolyse von Maissilage (2475) bei verschiedenen Temperaturen

Temperatur	°C	**246**	**275**	**334**	**344**	**407**	**505**	**607**	**698**
Aufheizrate	K/min	68	63	67	71	53	70	112	97
Input Einsatzstoff	kg/s	0,6597	0,6597	0,6597	0,6597	0,6597	0,6597	0,6597	0,6597
Brennstoffwärmeleistung	MW	10	10	10	10	10	10	10	10
Pyrolysegas									
Mengenstrom	kg/s	0,0072	0,0143	0,0301	0,0347	0,0813	0,0978	0,1116	0,1145
Wärmestrom (chemisch)	MW	0,0174	0,0346	0,0889	0,1106	0,2774	0,4463	0,7187	0,9600
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,0068	0,0077	0,0098	0,0101	0,0122	0,0157	0,0195	0,0229
Pyrolyseöl									
Mengenstrom	kg/s	0,0111	0,0217	0,0548	0,0757	0,1950	0,1929	0,1867	0,1885
Wärmestrom (chemisch)	MW	0,3154	0,5597	1,4294	1,9384	5,0463	5,0381	4,8255	5,0003
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,0298	0,0344	0,0446	0,0462	0,0579	0,0773	0,0998	0,1213
Pyrolysekoks									
Mengenstrom	kg/s	0,5405	0,5098	0,4301	0,3878	0,1717	0,1589	0,1506	0,1412
Wärmestrom (chemisch)	MW	9,7461	9,3983	8,5827	8,0984	4,5935	4,3086	4,1836	3,9344
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,1874	0,2147	0,2690	0,2700	0,2587	0,3131	0,3834	0,4109
Zersetzungswasser									
Mengenstrom	kg/s	0,0217	0,0348	0,0656	0,0823	0,1325	0,1309	0,1317	0,1364
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,1852	0,1887	0,1960	0,1972	0,2051	0,2176	0,2312	0,2435
Gutfeuchte									
Mengenstrom	kg/s	0,0792	0,0792	0,0792	0,0792	0,0792	0,0792	0,0792	0,0792
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,2264	0,2310	0,2405	0,2421	0,2524	0,2686	0,2863	0,3023
Summe Produkte									
chem. gebundene Wärme	MW	10,0789	9,9926	10,1010	10,1474	9,9173	9,7930	9,7278	9,8947
Fühlbare Wärme	MW	0,6356	0,6766	0,7598	0,7655	0,7863	0,8924	1,0202	1,1010

Tab Anhang M - 12: Ergebnisse der Modellierung (2) der Pyrolyse von Maissilage (2475) bei verschiedenen Temperaturen

Temperatur	°C	**246**	**275**	**334**	**344**	**407**	**505**	**607**	**698**
Aufheizrate	K/min	68	63	67	71	53	70	112	97
Input Ensatzstoff	kg/s	0,6597	0,6597	0,6597	0,6597	0,6597	0,6597	0,6597	0,6597
Brennstoffwärmeleistung	MW	10	10	10	10	10	10	10	10
Beheizung									
Q1	MW	0,3236	0,3236	0,3236	0,3236	0,3236	0,3236	0,3236	0,3236
Q2	MW	0,1065	0,1398	0,2106	0,2220	0,3012	0,4287	0,5720	0,7052
Q3	MW	0,0139	0,0184	0,0280	0,0295	0,0398	0,0561	0,0737	0,0897
Summe	MW	0,4439	0,4818	0,5622	0,5751	0,6646	0,8083	0,9693	1,1185
Zerlegungs-/Bildungswärmen									
Q-decomb	MW	3,0816	3,0816	3,0816	3,0816	3,0816	3,0816	3,0816	3,0816
Q-Gas	MW	0,0709	0,0723	0,0846	0,0889	0,0872	0,0911	0,1007	0,1067
Q-Öl	MW	0,4513	0,4944	0,5767	0,5875	0,6951	0,8597	1,0397	1,2093
Q-ZW	MW	0,8252	0,8262	0,8280	0,8283	0,8301	0,8328	0,8354	0,8375
Q-Koks	MW	2,0491	2,0337	1,7435	1,5622	0,4538	0,2636	-0,0068	-0,1410
Summe									
Input	MW	13,5255	13,5634	13,6438	13,6566	13,7461	13,8899	14,0509	14,2001
Output	MW	14,1112	14,0958	14,0936	13,9798	12,7698	12,7325	12,7170	13,0081
Differenz Output-Input	MW	0,5857	0,5324	0,4499	0,3232	-0,9763	-1,1574	-1,3339	-1,1920
Pyrolysewärme (chem.)	MW	0,0680	0,0575	0,0244	0,0034	-0,1159	-0,1137	-0,1076	-0,1093

Tab Anhang M - 13: Ergebnisse der Modellierung der Pyrolyse von Roggen-Ganzpflanzensilage (2473) bei verschiedenen Temperaturen

Temperatur	**°C**	**303**	**404**	**501**	**601**	**700**
Aufheizrate	K/min	43	53	73	90	110
Input Einsatzstoff	kg/s	0,6486	0,6486	0,6486	0,6486	0,6486
Brennstoffwärmeleistung	MW	10	10	10	10	10
Pyrolysegas						
Mengenstrom	kg/s	0,0593	0,0871	0,1033	0,1166	0,1245
Wärmestrom (chemisch)	MW	0,1472	0,2511	0,4729	0,7581	0,9675
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,0087	0,0121	0,0156	0,0193	0,0230
Pyrolyseöl						
Mengenstrom	kg/s	0,1253	0,1662	0,1910	0,1858	0,1792
Wärmestrom (chemisch)	MW	3,3505	4,6269	5,3591	5,3334	4,7709
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,0392	0,0573	0,0764	0,0984	0,1220
Pyrolysekoks						
Mengenstrom	kg/s	0,2817	0,2063	0,1734	0,1579	0,1606
Wärmestrom (chemisch)	MW	6,5379	4,8284	3,9296	3,5992	3,5508
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,1952	0,2446	0,2942	0,3592	0,4255
Zersetzungswasser						
Mengenstrom	kg/s	0,1044	0,1112	0,1030	0,1104	0,1065
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,1922	0,2047	0,2171	0,2304	0,2439
Gutfeuchte						
Mengenstrom	kg/s	0,0778	0,0778	0,0778	0,0778	0,0778
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,2316	0,2476	0,2634	0,2804	0,2977
Summe Produkte						
chem. gebundene Wärme	MW	10,0357	9,7064	9,7616	9,6907	9,2893
Fühlbare Wärme	MW	0,6668	0,7663	0,8668	0,9876	1,1121
Beheizung						
Q1	MW	0,3176	0,3176	0,3176	0,3176	0,3176
Q2	MW	0,1692	0,2896	0,4120	0,5480	0,6904
Q3	MW	0,0226	0,0387	0,0544	0,0714	0,0887
Summe	MW	0,5093	0,6458	0,7841	0,9370	1,0967
Zerlegungs-/Bildungswärmen						
Q-decomb	MW	2,6543	2,6543	2,6543	2,6543	2,6543
Q-Gas	MW	0,0737	0,0758	0,0846	0,0913	0,0996
Q-Öl	MW	0,5255	0,6838	0,8377	1,0114	1,1909
Q-ZW	MW	0,8270	0,8300	0,8327	0,8353	0,8376
Q-Koks	MW	0,8149	0,5329	0,2636	0,0609	0,0152
Summe						
Input	MW	13,1636	13,3001	13,4384	13,5914	13,7510
Output	MW	12,9436	12,5952	12,6471	12,6772	12,5446
Differenz Output-Input	MW	-0,2201	-0,7049	-0,7913	-0,9142	-1,2064
Pyrolysewärme (chem.)	MW	0,0357	-0,2936	-0,2384	-0,3093	-0,7107

Tab Anhang M - 14: Ergebnisse der Modellierung der Pyrolyse von Grünschnittroggensilage (2474) bei verschiedenen Temperaturen

Temperatur	°C	**302**	**335**	**399**	**505**	**601**	**703**
Aufheizrate	K/min	37	47	65	96	110	132
Input Einsatzstoff	kg/s	0,6662	0,6662	0,6662	0,6662	0,6662	0,6662
Brennstoffwärmeleistung	MW	10	10	10	10	10	10
Pyrolysegas							
Mengenstrom	kg/s	0,0318	0,0438	0,0318	0,0882	0,1100	0,1175
Wärmestrom (chemisch)	MW	0,0975	0,0964	0,0975	0,3907	0,6809	0,8330
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,0086	0,0098	0,0120	0,0157	0,0193	0,0231
Pyrolyseöl							
Mengenstrom	kg/s	0,0743	0,1047	0,0743	0,1899	0,1872	0,1972
Wärmestrom (chemisch)	MW	1,6997	2,4967	1,6997	4,7714	4,9438	4,8889
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,0390	0,0447	0,0564	0,0768	0,0982	0,1226
Pyrolysekoks							
Mengenstrom	kg/s	0,4173	0,3515	0,4173	0,2008	0,1758	0,1737
Wärmestrom (chemisch)	MW	8,1375	7,2890	8,1375	4,4980	3,9810	3,8096
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,2219	0,2090	0,2598	0,3180	0,3689	0,4399
Zersetzungswasser							
Mengenstrom	kg/s	0,0629	0,0862	0,0629	0,1074	0,1133	0,0978
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,1921	0,1962	0,2042	0,2173	0,2303	0,2442
Gutfeuchte							
Mengenstrom	kg/s	0,0799	0,0799	0,0799	0,0799	0,0799	0,0799
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,2377	0,2431	0,2536	0,2709	0,2879	0,3062
Summe Produkte							
chem. gebundene Wärme	MW	9,9346	9,8820	9,9346	9,6602	9,6058	9,5315
Fühlbare Wärme	MW	0,6993	0,7028	0,7861	0,8987	1,0046	1,1360
Beheizung							
Q1	MW	0,32579	0,32557	0,32579	0,32579	0,32579	0,32579
Q2	MW	0,17321	0,21268	0,29118	0,42405	0,55912	0,70843
Q3	MW	0,02305	0,02842	0,03897	0,05624	0,07324	0,09152
Summe	MW	0,5221	0,5667	0,6559	0,8061	0,9582	1,1257
Zerlegungs-/Bildungswärmen							
Q-decomb	MW	2,8353	2,8357	2,8357	2,8357	2,8357	2,8357
Q-Gas	MW	0,0849	0,0897	0,0916	0,0933	0,0932	0,0999
Q-Öl	MW	0,5293	0,5768	0,6803	0,8549	1,0344	1,2245
Q-ZW	MW	0,8270	0,8280	0,8299	0,8328	0,8353	0,8376
Q-Koks	MW	1,4683	0,5495	0,5559	0,4411	0,2244	0,1083
Summe							
Input	MW	13,3573	13,4024	13,4916	13,6418	13,7939	13,9615
Output	MW	13,5435	12,6288	12,8784	12,7809	12,7976	12,9379
Differenz Output-Input	MW	0,1862	-0,7735	-0,6132	-0,8608	-0,9963	-1,0236
Pyrolysewärme (chem.)	MW	-0,0654	-0,1180	-0,0654	-0,3398	-0,3942	-0,4685

Tab Anhang M - 15: Ergebnisse der Modellierung der Pyrolyse von Xylan (1234) und Xylan, Birkenholz (2664) bei verschiedenen Temperaturen

Einsatzstoff		**Xylan (1234)**			**Xylan, Birkenholz (2664)**		
Temperatur	**°C**	**265**	**404**	**703**	**374**	**502**	**701**
Aufheizrate	K/min	49	100	163	55	87	169
Input Einsatzstoff	kg/s	0,7413	0,7413	0,7413	0,7413	0,7413	0,7413
Brennstoffwärmeleistung	MW	10	10	10	10	10	10
Pyrolysegas							
Mengenstrom	kg/s	0,0243	0,1052	0,1800	0,1352	0,1655	0,1695
Wärmestrom (chemisch)	MW	0,0596	0,7270	1,0932	0,5726	0,9016	1,3233
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,0074	0,0122	0,0231	0,0111	0,0156	0,0230
Pyrolyseöl							
Mengenstrom	kg/s	0,0606	0,1765	0,1148	0,1623	0,1717	0,1776
Wärmestrom (chemisch)	MW	1,5494	4,3612	3,4810	4,1841	4,6484	4,5767
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,0329	0,0572	0,1227	0,0517	0,0767	0,1223
Pyrolysekoks							
Mengenstrom	kg/s	0,5562	0,2300	0,1770	0,2187	0,1807	0,1757
Wärmestrom (chemisch)	MW	9,3268	5,6119	4,4261	5,1290	4,1595	3,9072
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,2312	0,3128	0,5620	0,2672	0,3642	0,5387
Zersetzungswasser							
Mengenstrom	kg/s	0,0112	0,1406	0,1805	0,1361	0,1343	0,1295
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,1875	0,2047	0,2442	0,2010	0,2173	0,2440
Gutfeuchte							
Mengenstrom	kg/s	0,0890	0,0890	0,0890	0,0890	0,0890	0,0890
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,2579	0,2829	0,3407	0,2775	0,3013	0,3404
Summe Produkte							
chem. gebundene Wärme	MW	10,9359	10,7000	9,0004	9,8858	9,7096	9,8072
Fühlbare Wärme	MW	0,7169	0,8697	1,2928	0,8085	0,9751	1,2685
Beheizung							
Q1	MW	0,3586	0,3586	0,3586	0,3588	0,3588	0,3588
Q2	MW	0,1394	0,3181	0,7625	0,2783	0,4551	0,7599
Q3	MW	0,0190	0,0441	0,1019	0,0386	0,0625	0,1016
Summe	MW	0,5170	0,7207	1,2230	0,6757	0,8764	1,2203
Zerlegungs-/Bildungswärmen							
Q-decomb	MW	3,5643	3,5643	3,5643	3,5643	3,5643	3,5643
Q-Gas	MW	0,0732	0,1331	0,0928	0,1038	0,1042	0,1089
Q-Öl	MW	0,5350	0,7150	1,3460	0,6912	0,9273	1,3270
Q-ZW	MW	0,8259	0,8300	0,8376	0,8292	0,8327	0,8376
Q-Koks	MW	2,6467	1,3032	0,5331	1,1606	0,7568	0,5041
Summe							
Input	MW	14,0812	14,2850	14,7872	14,2400	14,4407	14,7846
Output	MW	15,7336	14,5510	13,1027	13,4790	13,3057	13,8533
Differenz Output-Input	MW	1,6524	0,2660	-1,6845	-0,7610	-1,1349	-0,9312
Pyrolysewärme (chem.)	MW	0,9359	0,7000	-0,9996	-0,1142	-0,2904	-0,1928

Ergebnisse der Modellierung auf Basis der Daten für die Variation der Aufheizgeschwindigkeit bei Pyrolysetemperaturen von 400 und 500 °C für verschiedene Biomassen

Tab Anhang M - 16: Ergebnisse der Modellierung der Pyrolyse von Weizenstroh (2275) bei verschiedenen Aufheizgeschwindigkeiten und Pyrolysetemperaturen von 400 °C

Aufheizrate	**K/min**	**6**	**12**	**20**	**65**
Input Einsatzstoff	kg/s	0,6795	0,6795	0,6795	0,6795
Brennstoffwärmeleistung	MW	10	10	10	10
Pyrolysegas					
Mengenstrom	kg/s	0,1264	0,1140	0,1159	0,0965
Wärmestrom (chemisch)	MW	0,5273	0,4949	0,5556	0,3166
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,0120	0,0120	0,0120	0,0120
Pyrolyseöl					
Mengenstrom	kg/s	0,1087	0,1122	0,1355	0,1763
Wärmestrom (chemisch)	MW	2,8638	2,6963	3,6187	4,1419
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,0565	0,0565	0,0565	0,0565
Pyrolysekoks					
Mengenstrom	kg/s	0,2572	0,2645	0,2370	0,2197
Wärmestrom (chemisch)	MW	6,0944	6,2404	5,5345	5,2286
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,2619	0,2639	0,2608	0,2549
Zersetzungswasser					
Mengenstrom	kg/s	0,1056	0,1072	0,1096	0,1054
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,2042	0,2042	0,2042	0,2042
Gutfeuchte					
Mengenstrom	kg/s	0,0815	0,0815	0,0815	0,0815
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,2587	0,2587	0,2587	0,2587
Summe Produkte					
chem. gebundene Wärme	MW	9,4855	9,4316	9,7087	9,6870
Fühlbare Wärme	MW	0,7933	0,7953	0,7922	0,7863
Beheizung					
Q1	MW	0,3298	0,3298	0,3298	0,3298
Q2	MW	0,2891	0,2891	0,2891	0,2891
Q3	MW	0,0398	0,0398	0,0398	0,0398
Summe	MW	0,6587	0,6587	0,6587	0,6587
Zerlegungs-/Bildungswärmen					
Q-decomb	MW	2,9439	2,9439	2,9439	2,9439
Q-Gas	MW	0,0878	0,0906	0,0910	0,0847
Q-Öl	MW	0,6869	0,6840	0,6838	0,6902
Q-ZW	MW	0,8299	0,8299	0,8299	0,8299
Q-Koks	MW	0,7495	0,7977	0,7139	0,6315
Summe					
Input	MW	13,6026	13,6026	13,6026	13,6026
Output	MW	12,6330	12,6291	12,8196	12,7097
Differenz Output-Input	MW	-0,9695	-0,9734	-0,7829	-0,8929
Pyrolysewärme (chem.)	MW	-0,5145	-0,5684	-0,2913	-0,3130

Tab Anhang M - 17: Ergebnisse der Modellierung der Pyrolyse von Weizenstroh (2275) bei verschiedenen Aufheizgeschwindigkeiten und Pyrolysetemperaturen von 500 °C

Aufheizrate	**K/min**	**5**	**10**	**16**	**78**	**84**
Input Einsatzstoff	kg/s	0,6795	0,6795	0,6795	0,6795	0,6795
Brennstoffwärmeleistung	MW	10	10	10	10	10
Pyrolysegas						
Mengenstrom	kg/s	0,1283	0,1417	0,1421	0,1207	0,1239
Wärmestrom (chemisch)	MW	0,7599	0,8525	0,8647	0,5562	0,5651
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,0156	0,0156	0,0156	0,0156	0,0156
Pyrolyseöl						
Mengenstrom	kg/s	0,1473	0,1368	0,1429	0,1625	0,1653
Wärmestrom (chemisch)	MW	3,9298	3,8551	4,0007	4,2320	4,5004
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,0763	0,0763	0,0763	0,0763	0,0763
Pyrolysekoks						
Mengenstrom	kg/s	0,1975	0,1975	0,1938	0,1946	0,1925
Wärmestrom (chemisch)	MW	4,9585	4,9361	4,7333	4,6879	4,6474
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,3114	0,3094	0,3106	0,3221	0,3216
Zersetzungswasser						
Mengenstrom	kg/s	0,1248	0,1219	0,1190	0,1202	0,1162
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,2170	0,2170	0,2170	0,2170	0,2170
Gutfeuchte						
Mengenstrom	kg/s	0,0815	0,0815	0,0815	0,0815	0,0815
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,2759	0,2759	0,2759	0,2759	0,2759
Summe Produkte						
chem. gebundene Wärme	MW	9,6482	9,6437	9,5987	9,4760	9,7129
Fühlbare Wärme	MW	0,8961	0,8942	0,8954	0,9069	0,9064
Beheizung						
Q1	MW	0,3298	0,3298	0,3298	0,3298	0,3298
Q2	MW	0,4187	0,4187	0,4187	0,4187	0,4187
Q3	MW	0,0569	0,0569	0,0569	0,0569	0,0569
Summe	MW	0,8054	0,8054	0,8054	0,8054	0,8054
Zerlegungs-/Bildungswärmen						
Q-decomb	MW	2,9439	2,9439	2,9439	2,9439	2,9439
Q-Gas	MW	0,0928	0,0929	0,0930	0,0884	0,0896
Q-Öl	MW	0,8551	0,8545	0,8540	0,8592	0,8583
Q-ZW	MW	0,8327	0,8327	0,8327	0,8327	0,8327
Q-Koks	MW	0,3155	0,3381	0,2923	0,4324	0,3538
Summe						
Input	MW	13,7493	13,7493	13,7493	13,7493	13,7493
Output	MW	12,6404	12,6561	12,5661	12,5955	12,7536
Differenz Output-Input	MW	-1,1089	-1,0933	-1,1832	-1,1538	-0,9957
Pyrolysewärme (chem.)	MW	-0,3518	-0,3563	-0,4013	-0,5240	-0,2871

Tab Anhang M - 18: Ergebnisse der Modellierung der Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) bei verschiedenen Aufheizgeschwindigkeiten und Pyrolysetemperaturen von 400 °C

Aufheizrate	**K/min**	**6**	**10**	**22**	**69**
Input Einsatzstoff	kg/s	0,6019	0,6019	0,6019	0,6019
Brennstoffwärmeleistung	MW	10	10	10	10
Pyrolysegas					
Mengenstrom	kg/s	0,0753	0,0751	0,0700	0,0507
Wärmestrom (chemisch)	MW	0,3392	0,3155	0,3898	0,2245
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,0120	0,0120	0,0120	0,0120
Pyrolyseöl					
Mengenstrom	kg/s	0,1348	0,1369	0,1359	0,1628
Wärmestrom (chemisch)	MW	3,3910	3,4695	3,4203	3,6816
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,0565	0,0565	0,0565	0,0565
Pyrolysekoks					
Mengenstrom	kg/s	0,2201	0,2194	0,2297	0,2194
Wärmestrom (chemisch)	MW	6,0938	6,0365	6,1192	5,9905
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,2400	0,2415	0,2502	0,2451
Zersetzungswasser					
Mengenstrom	kg/s	0,0994	0,0982	0,0941	0,0968
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,2042	0,2042	0,2042	0,2042
Gutfeuchte					
Mengenstrom	kg/s	0,0722	0,0722	0,0722	0,0722
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,2292	0,2292	0,2292	0,2292
Summe Produkte					
chem. gebundene Wärme	MW	9,8239	9,8215	9,9293	9,8966
Fühlbare Wärme	MW	0,7418	0,7433	0,7521	0,7469
Beheizung					
Q1	MW	0,2936	0,2936	0,2936	0,2936
Q2	MW	0,2626	0,2626	0,2626	0,2626
Q3	MW	0,0352	0,0352	0,0352	0,0352
Summe	MW	0,5915	0,5915	0,5915	0,5915
Zerlegungs-/Bildungswärmen					
Q-decomb	MW	2,6281	2,6281	2,6281	2,6281
Q-Gas	MW	0,0882	0,0831	0,0966	0,0992
Q-Öl	MW	0,6082	0,6124	0,5990	0,5965
Q-ZW	MW	0,8299	0,8299	0,8299	0,8299
Q-Koks	MW	0,6232	0,6533	0,7692	0,7316
Summe					
Input	MW	13,2196	13,2196	13,2196	13,2196
Output	MW	12,7153	12,7436	12,9761	12,9007
Differenz Output-Input	MW	-0,5043	-0,4760	-0,2435	-0,3189
Pyrolysewärme (chem.)	MW	-0,1761	-0,1785	-0,0707	-0,1034

Tab Anhang M - 19: Ergebnisse der Modellierung der Pyrolyse von Waldrestholz (Fichte mit Rinde, 2472) bei verschiedenen Aufheizgeschwindigkeiten und Pyrolysetemperaturen von 500 °C

Aufheizrate	**K/min**	**6**	**10**	**19**	**72**
Input Einsatzstoff	kg/s	0,6019	0,6019	0,6019	0,6019
Brennstoffwärmeleistung	MW	10	10	10	10
Pyrolysegas					
Mengenstrom	kg/s	0,0902	0,0942	0,0966	0,0915
Wärmestrom (chemisch)	MW	0,6177	0,6471	0,7918	0,5533
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,0156	0,0156	0,0156	0,0156
Pyrolyseöl					
Mengenstrom	kg/s	0,1272	0,1467	0,1562	0,1786
Wärmestrom (chemisch)	MW	3,2110	3,6964	3,7971	4,3438
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,0763	0,0763	0,0763	0,0763
Pyrolysekoks					
Mengenstrom	kg/s	0,1974	0,1839	0,1773	0,1655
Wärmestrom (chemisch)	MW	5,8965	5,3912	5,1204	4,8761
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,2932	0,2972	0,2972	0,2986
Zersetzungswasser					
Mengenstrom	kg/s	0,1148	0,1049	0,0995	0,0941
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,2170	0,2170	0,2170	0,2170
Gutfeuchte					
Mengenstrom	kg/s	0,0722	0,0722	0,0722	0,0722
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,2444	0,2444	0,2444	0,2444
Summe Produkte					
chem. gebundene Wärme	MW	9,7252	9,7348	9,7093	9,7731
Fühlbare Wärme	MW	0,8465	0,8504	0,8505	0,8519
Beheizung					
Q1	MW	0,2936	0,2936	0,2936	0,2936
Q2	MW	0,3820	0,3820	0,3820	0,3820
Q3	MW	0,0504	0,0504	0,0504	0,0504
Summe	MW	0,7260	0,7260	0,7260	0,7260
Zerlegungs-/Bildungswärmen					
Q-decomb	MW	2,6281	2,6281	2,6281	2,6281
Q-Gas	MW	0,1011	0,1019	0,1069	0,1004
Q-Öl	MW	0,7533	0,7525	0,7475	0,7539
Q-ZW	MW	0,8327	0,8327	0,8327	0,8327
Q-Koks	MW	0,2719	0,3561	0,4580	0,3686
Summe					
Input	MW	13,3541	13,3541	13,3541	13,3541
Output	MW	12,5306	12,6285	12,7049	12,6807
Differenz Output-Input	MW	-0,8235	-0,7256	-0,6492	-0,6734
Pyrolysewärme (chem.)	MW	-0,2748	-0,2652	-0,2907	-0,2269

Tab Anhang M - 20: Ergebnisse der Modellierung der Pyrolyse von Sägerestholz (Fichte rindenfrei, 2276) bei verschiedenen Aufheizgeschwindigkeiten und einer Pyrolysetemperatur von 500 °C

Aufheizrate	**K/min**	**5**	**11**	**19**	**70**	**80**
Input Einsatzstoff	kg/s	0,6183	0,6183	0,6183	0,6183	0,6183
Brennstoffwärmeleistung	MW	10	10	10	10	10
Pyrolysegas						
Mengenstrom	kg/s	0,1109	0,1060	0,1063	0,0754	0,0722
Wärmestrom (chemisch)	MW	0,8517	0,8620	0,5214	0,5275	0,4604
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,0163	0,0156	0,0156	0,0158	0,0159
Pyrolyseöl						
Mengenstrom	kg/s	0,1543	0,1751	0,1931	0,2291	0,2293
Wärmestrom (chemisch)	MW	4,1621	4,3515	4,9544	5,8322	5,6862
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,0803	0,0761	0,0765	0,0774	0,0779
Pyrolysekoks						
Mengenstrom	kg/s	0,1581	0,1517	0,1409	0,1361	0,1410
Wärmestrom (chemisch)	MW	5,0707	4,8414	4,4515	4,1302	4,1852
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,3173	0,3058	0,3282	0,3188	0,3263
Zersetzungswasser						
Mengenstrom	kg/s	0,1209	0,1113	0,1037	0,1035	0,1016
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,2195	0,2169	0,2172	0,2177	0,2180
Gutfeuchte						
Mengenstrom	kg/s	0,0742	0,0742	0,0742	0,0742	0,0742
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,2541	0,2509	0,2512	0,2519	0,2522
Summe Produkte						
chem. gebundene Wärme	MW	10,0845	10,0549	9,9273	10,4900	10,3317
Fühlbare Wärme	MW	0,8875	0,8652	0,8887	0,8815	0,8902
Beheizung						
Q1	MW	0,3035	0,3035	0,3035	0,3035	0,3035
Q2	MW	0,4255	0,3993	0,4020	0,4073	0,4102
Q3	MW	0,0549	0,0517	0,0520	0,0526	0,0530
Summe	MW	0,7838	0,7545	0,7575	0,7634	0,7667
Zerlegungs-/Bildungswärmen						
Q-decomb	MW	3,0448	3,0448	3,0448	3,0448	3,0448
Q-Gas	MW	0,1056	0,1080	0,1006	0,1082	0,1067
Q-Öl	MW	0,8167	0,7795	0,7904	0,7897	0,7949
Q-ZW	MW	0,8332	0,8327	0,8327	0,8328	0,8329
Q-Koks	MW	0,2102	0,1163	0,1715	0,3701	0,3651
Summe						
Input	MW	13,8287	13,7993	13,8023	13,8083	13,8116
Output	MW	12,9376	12,7566	12,7111	13,4724	13,3215
Differenz Output-Input	MW	-0,8910	-1,0428	-1,0912	-0,3359	-0,4900
Pyrolysewärme (chem.)	MW	0,0845	0,0549	-0,0727	0,4900	0,3317

Tab Anhang M - 21: Ergebnisse der Modellierung der Pyrolyse von Triticale-Ganzpflanze (2471) bei verschiedenen Aufheizgeschwindigkeiten und einer Pyrolysetemperatur von 500 °C

Aufheizrate	**K/min**	**6**	**10**	**21**	**77**
Input Einsatzstoff	kg/s	0,6703	0,6703	0,6703	0,6703
Brennstoffwärmeleistung	MW	10	10	10	10
Pyrolysegas					
Mengenstrom	kg/s	0,1116	0,1122	0,1130	0,1054
Wärmestrom (chemisch)	MW	0,6545	0,6662	0,6920	0,5062
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,0156	0,0156	0,0156	0,0156
Pyrolyseöl					
Mengenstrom	kg/s	0,1681	0,1645	0,1708	0,1893
Wärmestrom (chemisch)	MW	4,4122	4,4180	4,7397	5,4474
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,0763	0,0763	0,0763	0,0763
Pyrolysekoks					
Mengenstrom	kg/s	0,1835	0,1846	0,1818	0,1641
Wärmestrom (chemisch)	MW	5,0172	4,9917	4,7902	4,4701
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,3193	0,3265	0,3295	0,3215
Zersetzungswasser					
Mengenstrom	kg/s	0,1266	0,1285	0,1243	0,1310
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,2170	0,2170	0,2170	0,2170
Gutfeuchte					
Mengenstrom	kg/s	0,0804	0,0804	0,0804	0,0804
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,2721	0,2721	0,2721	0,2721
Summe Produkte					
chem. gebundene Wärme	MW	10,0839	10,0759	10,2219	10,4237
Fühlbare Wärme	MW	0,9003	0,9075	0,9105	0,9025
Beheizung					
Q1	MW	0,3278	0,3278	0,3278	0,3278
Q2	MW	0,4253	0,4253	0,4253	0,4253
Q3	MW	0,0562	0,0562	0,0562	0,0562
Summe	MW	0,8093	0,8093	0,8093	0,8093
Zerlegungs-/Bildungswärmen					
Q-decomb	MW	3,1692	3,1692	3,1692	3,1692
Q-Gas	MW	0,0992	0,0989	0,1005	0,0956
Q-Öl	MW	0,8526	0,8535	0,8520	0,8564
Q-ZW	MW	0,8327	0,8327	0,8327	0,8327
Q-Koks	MW	0,3717	0,3896	0,4334	0,3146
Summe					
Input	MW	13,9786	13,9786	13,9786	13,9786
Output	MW	13,1404	13,1580	13,3510	13,4255
Differenz Output-Input	MW	-0,8382	-0,8205	-0,6276	-0,5531
Pyrolysewärme (chem.)	MW	0,0839	0,0759	0,2219	0,4237

Tab Anhang M - 22: Ergebnisse der Modellierung der Pyrolyse von Maissilage (2475) bei verschiedenen Aufheizgeschwindigkeiten und einer Pyrolysetemperatur von 500 °C

Aufheizrate	**K/min**	**6**	**10**	**19**	**70**
Input Einsatzstoff	kg/s	0,6597	0,6597	0,6597	0,6597
Brennstoffwärmeleistung	MW	10	10	10	10
Pyrolysegas					
Mengenstrom	kg/s	0,1012	0,0985	0,1035	0,0978
Wärmestrom (chemisch)	MW	0,5762	0,5202	0,5979	0,4463
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,0156	0,0156	0,0156	0,0157
Pyrolyseöl					
Mengenstrom	kg/s	0,1365	0,1509	0,1873	0,1929
Wärmestrom (chemisch)	MW	3,6932	4,0526	4,8124	5,3957
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,0765	0,0765	0,0768	0,0773
Pyrolysekoks					
Mengenstrom	kg/s	0,2030	0,1988	0,1713	0,1589
Wärmestrom (chemisch)	MW	5,5483	5,3358	4,4933	4,3086
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,3175	0,3227	0,3247	0,3131
Zersetzungswasser					
Mengenstrom	kg/s	0,1398	0,1324	0,1185	0,1309
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,2171	0,2171	0,2173	0,2176
Gutfeuchte					
Mengenstrom	kg/s	0,0792	0,0792	0,0792	0,0792
Wärmestrom (fühlbar)	MW	0,2680	0,2680	0,2682	0,2686
Summe Produkte					
chem. gebundene Wärme	MW	9,8177	9,9086	9,9036	10,1506
Fühlbare Wärme	MW	0,8947	0,8998	0,9027	0,8923
Beheizung					
Q1	MW	0,3236	0,3236	0,3236	0,3236
Q2	MW	0,4237	0,4234	0,4256	0,4287
Q3	MW	0,0554	0,0554	0,0557	0,0561
Summe	MW	0,8027	0,8024	0,8048	0,8083
Zerlegungs-/Bildungswärmen					
Q-decomb	MW	3,0816	3,0816	3,0816	3,0816
Q-Gas	MW	0,0964	0,0959	0,0980	0,0910
Q-Öl	MW	0,8481	0,8485	0,8486	0,8598
Q-ZW	MW	0,8327	0,8327	0,8328	0,8328
Q-Koks	MW	0,2951	0,3858	0,4408	0,2636
Summe					
Input	MW	13,8843	13,8840	13,8864	13,8899
Output	MW	12,7847	12,9712	13,0264	13,0901
Differenz Output-Input	MW	-1,0996	-0,9128	-0,8600	-0,7998
Pyrolysewärme (chem.)	MW	-0,1823	-0,0914	-0,0964	0,1506