A R B E I T S B E R I C H T

Institut für Holzchemie und chemische Technologie des Holzes

Wirtschaftliche Realisierung der Flashpyrolyse von Altholz mit anschließender energetischer Verwertung in einem BHKW

von

Dietrich Meier. Stefan Schöll und Susanne Hoffmann

Bundesforschungsanstalt
für Forst- und Holzwirtschaft

und

Z e n t r u m H o l z w i r t s c h a f t

Universität Hamburg

Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft Hamburg
Hausadresse: Leuschnerstr. 91, 21031 Hamburg
Postadresse: Postfach 80 02 09, 21002 Hamburg

Tel: 040 / 73962-501
Fax: 040 / 73962-480
Email: d.meier@holz.uni-hamburg.de
Internet: http://www.bfafh.de

Institut für Holzchemie und chemische Technologie des Holzes

Wirtschaftliche Realisierung der Flashpyrolyse von Altholz mit anschließender energetischer Verwertung in einem BHKW

von

Dietrich Meier. Stefan Schöll und Susanne Hoffmann

Arbeitsbericht des Instituts für Holzchemie und chemische Technologie des Holzes
2007 / 1

Hamburg, Mai 2007

1 Zusammenfassung 6
2 Vorbemerkung 8
2.1 Biomasseeinsatz 8
2.2 Zeitschiene und Projektpartner 9
3 Projektüberblick 11
3.1 Überblick Projektphasen 11
3.2 Ablative Pyrolyse im Labormaßstab und Upscaling 12
3.3 Ablative Pyrolyse im Pilotmaßstab 13
3.4 Energetische Verwertung der Pyrolyseprodukte 13
3.4.1 Kontrolle der Produktqualität 13
3.4.2 Nutzung in Dieselmotoren 15
3.5 Immissionschutzrechtliche Beurteilung der Anlage 15
4 Einführung 16
4.1 Allgemeines zur Nutzung regenerativer Energie 16
4.2 Rolle der Biomasse unter den regenerativen Energien 16
4.3 Naturschutzbelange bei der energetischen Nutzung von Biomasse 18
4.4 Verfügbarkeit nachwachsender Rohstoffe 19
5 Allgemeiner Teil 21
5.1 Grundlagen des Pyrolyseprozesses 21
5.1.1 Arten der Pyrolyse 21
5.1.2 Determinierende Prozessparameter 22
5.1.3 Eigenschaften und Anwendungen der Produkte 24
5.2 Verfahren und Anwendungen der Flash-Pyrolyse 26
5.2.1 Überblick über Verfahrenstypen der Flash-Pyrolyse 26
5.2.2 Realisierte Anlagen und Projekte 29
5.3 Die ablative Flashpyrolyse 30
5.3.1 Prinzip und determinierende Faktoren 30
5.3.2 Vergleichende Gegenüberstellung von Verfahrensarten 33
5.4 Energetische Nutzung von Pyrolyseöl 34
5.4.1 Vorteile gegenüber anderen Verfahren 34
5.4.2 Verbrennungsverhalten von Pyrolyseöl 34
5.4.3 Stand der Technik 37

6 Betrieb der PYTEC Laboranlage 39
6.1 Zielsetzung 39
6.2 Beschreibung der Laboranlage 39
6.2.1 Überblick über die Verfahrensschritte 39
6.2.2 Detaillierte Anlagenbetriebsbeschreibung 41
6.3 Ziele der Prozessführung 45
6.4 Verfahrenstechnische Schwierigkeiten und Erkenntnisse 48
6.4.1 Holzzuführung 48
6.4.2 Reaktor / Heizplatte 50
6.4.3 Zyklon / Überströmrohr 54
6.4.4 Kondensation 56
6.5 Analysen und Ergebnisse 57
6.5.1 Regelung und Messung des Pyrolyseprozesses 57
6.5.2 Probenahme und Analysen 61
7 Auslegung und Konstruktion der Pilotanlage 63
7.1 Überblick und Randbedingungen 63
7.2 Lagerung und Trocknung 64
7.3 Zuführung der Biomasse 64
7.3.1 Anforderungen an die Holzzuführung 64
7.3.2 Konzepte 65
7.3.3 Aufbau des Versuchsstands 66
7.3.4 Zuführung der Pilotanlage 68
7.4 Pyrolysator 68
7.5 Kondensator 69
8 Energetische Verwertung des Pyrolyseöls 70
8.1 Versuchsphase bei MWB 70
8.1.1 Versuchsdaten 70
8.1.2 Versuchsdurchführungen 71
8.1.3 Fazit 73
8.2 Versuchsphase bei S.E.A.D. 73
8.2.1 Versuchsdaten 73
8.2.2 Versuchsablauf 74

8.2.3 Fazit 75
8.3 Aktivitäten zur Optimierung der energetischen Nutzung 75
9 Gesetzliche Auflagen zum Bau und Betrieb 79
9.1 Genehmigungserfordernis 79
9.2 Baurechtliche Schwierigkeiten 80
9.3 Beurteilung der Emissionen 81
9.3.1 Überblick 81
9.3.2 Luftverunreinigende Emissionen 82
9.3.3 Schallemissionen 87
9.3.4 Auflagen seitens der Behörde 87
9.4 Gefährdungsbeurteilung 92
9.5 Beurteilung der Abfall- / Abwassersituation 93
9.6 Einschätzung seitens des Natur- und Landschaftsschutz 93
10 Öffentlichkeitsarbeit 94
10.1 Vorträge: 94
10.2 Messen: 94
10.3 Publikationen 95
10.4 Presse: 95
11 Ergebnisbetrachtung 96
11.1 Wirtschaftlicher und wissenschaftlicher Erfolg 96
11.2 Ausblick – Weiterführende Projektvorhaben 96
12 Tabellenverzeichnis 98
13 Abbildungsverzeichnis 99
14 Literaturverzeichnis 100

1 Zusammenfassung

Die energetische Nutzung von Biomasse ist ein Thema, das vor dem Hintergrund der zunehmend brisanter werdenden Klimaproblematik vermehrt in den Mittelpunkt rückt. Gestützt durch diverse Förderinstrumente werden unterschiedliche Technologielinien erforscht und entwickelt, um neue Wege zu finden, Biomasse ökologisch wie ökonomisch effizient einzusetzen. Interessant sind vor allem Verfahren zu Gewinnung von flüssigen Biokraftstoffen, die direkt die etablierten flüssigen fossilen Energieträger ersetzen könnten.

Eine sehr junge Technologie auf diesem Gebiet ist die Verflüssigung von Biomasse durch die Flash-Pyrolyse. Diese Technologie kann auf unterschiedlichen verfahrenstechnischen Wegen realisiert werden, bis dato konnte sich jedoch noch keines der Verfahren endgültig auf dem Markt durchsetzen. In diesem Zusammenhang wurde von der PYTEC in Zusammenarbeit mit der BFH Hamburg ein innovatives Verfahren geplant und ausgelegt, das im gegenständlichen Vorhaben realisiert und erprobt wurde. Das Verfahren wird als ablative Flashpyrolyse bezeichnet, es wurde darauf ausgelegt, entscheidende wirtschaftliche Vorteile gegenüber bereits bekannten Verfahren zu bieten.

Ziel des gegenständlichen Projektes war die Entwicklung einer Prototypanlage für das Flashpyrolyseverfahren zur energetischen Umsetzung von lignocellulosischer Biomasse. Dies bedeutet, dass das entwickelte Verfahren nicht nur in der Verflüssigung der Biomasse besteht, sondern auch die energetische Verwertung umfasst. Die energetische Verwertung soll in einem BHKW mit Diesel-Aggregat stattfinden, in dem sowohl thermische, als auch elektrische Energie aus dem Biokraftstoff gewonnen werden.

Die Anlage soll in Containern untergebracht werden, so dass die Errichtung lediglich in Aufstellung und Installation der bereits fertig im Container gelieferten Anlageneinheiten besteht. In kleinen Einheiten können die entwickelten Anlagen dann dezentral, am Ort des Biomasseanfalls, eingesetzt werden. Das Verfahren der Flashpyrolyse ermöglicht dabei auch die Wertschöpfung den Anteilen der Biomasse, die oft noch als Reststoffe unverwertet bleiben (z. B. Stroh, Waldrestholz).

Zur Erreichung des gesetzten Zieles wurde zunächst eine Technikumsanlage konstruiert und errichtet. Diese Anlage wurde zur Verarbeitung von 16 kg/h Holz ausgelegt. Durch die Erprobung der Technikumsanlage wurden die notwendigen Daten zur Auslegung der Prototypenanlage erarbeitet. Die Verfahrenstechnische Auslegung wurde von der PYTEC geleistet, mit der Konstruktion der Anlage wurde die TEC betraut. Eine weitere Versuchseinheit wurden für das System zur Biomassebeschickung des Prototypenanlage entworfen und realisiert, da die Holzzuführung der Prototypenanlage sich aus technischen Gründen wesentlich von der Holzzuführung der Technikumsanlage unterscheidet.

Parallel zur Entwicklung des Pyrolyseverfahrens wurden die Möglichkeiten der energetischen Verwertung erprobt und ausgereift. Aufgrund der Unterschiede zwischen dem in der Pyrolyse entstehenden Kraftstoffes und den herkömmlichen Dieselkraftstoffen bedarf es speziellen robusten Dieselmotoren, die zusätzlich werkstofflichen Modifikationen unterworfen werden müssen. Sowohl die passende Motorentechnik, als auch die nutzbaren Werkstoffe wurden in diversen Versuchsreihen festgelegt. Im Besonderen mussten die Einspritzsysteme detailliert auf die veränderten Kraftstoffeigenschaften abgestimmt werden.

Nach Fertigstellung der einzelnen Komponenten der Anlage bei den Herstellern wurden diese abgenommen und als Gesamtsystem am Versuchsstandort aufgebaut. Zur Beschleunigung des Projektfortschritts wurden zunächst mit der vorläufigen behördlichen

Genehmigung zum Probebetrieb die einzelnen Anlagenkomponenten in Betrieb genommen. Dabei wurden die Funktionen der Anlagenteile im Einzelnen überprüft und die Verfahrensparameter eingestellt.

Nach Erteilung der Genehmigung konnte die Erprobungsphase der Gesamtanlage erfolgen. Die Abstimmung der Anlagenkomponenten untereinander, sowie die Verbesserung einiger Konstruktionsfehler mussten durchgeführt werden. Zur endgültigen Abnahme müssen noch die abschließenden sicherheitstechnischen Maßnahmen zur Erfüllung der geltenden EU-Richtlinien getroffen werden.

Die Abschätzung der Wirtschaftlichkeit, mit der die Pyrolyseanlage gewerblich betrieben werden kann, wurde nach den heutigen Erkenntnissen des bisherigen Probebetriebs aktualisiert. Die Berechnungen wurden mit Hilfe der statischen Kennzahlen Gesamtkapitalrentabilität und Amortisationsdauer durchgeführt. Die wesentlichsten Einflussfaktoren sind hierbei der Biomassepreis und die Anlagengröße. Nach gegenwärtigen Erfahrungen ist bei dem heutigen Biomassepreis eine Anlagenkapazität von etwa 50 tato wirtschaftlich am sinnvollsten.

2 Vorbemerkung

2.1 Biomasseeinsatz

Die ablative Flashpyrolyse ist ein junges Verfahren, das im gegenständlichen Projekt weltweit erstmals im industriellen Maßstab realisiert wurde. Der Prozess ist im Prinzip simple und zeichnet sich durch einen geringen Energiebedarf und geringen anlagentechnischen Aufwand aus.

Ursprünglich wurde das Projekt zur Verwertung von Altholz definiert. Im Laufe des Projekts erwies es sich jedoch als günstiger, an Stelle des Altholzes Industrierestholz in Form von Hackschnitzeln zu verwerten. Diese Entscheidung wurde vor dem Hintergrund getroffen, dass sich die verfügbaren Potentiale dieser Holzklassen nicht wesentlich voneinander unterscheiden (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Technische Potenziale, Nutzung biogener Festbrennstoffe und Anteil der Nutzung am Potenzial sowie die entsprechenden Anteile am fossilen Primärenergieverbrauch (PEV) in Deutschland differenziert nach biogenen Festbrennstoffen (angegebene Werte stellen lediglich Größenordnungen dar; Erkenntnisstand 2003) [1].

	Potenziale	Nutzung	Anteile in %		
	in PJ/a		Nutzung/Potenzial	Potenzial/PEV	Nutzung/PEV
Waldrestholz	169	147-165	34-38	3,0	1,0-1,1
Schwachholz	123				
Zusätzlich nutzbares Waldholz[a]	132				
Industrierestholz	57	51	90	0,4	0,4
Altholz	78	62	80	0,5	0,4
Sonstige holzartige Biomasse	10	1	10	0,1	0,0
Stroh	130	3	2	0,9	0,0
Gras aus Dauergrünland etc.	37-55	0	0	0,3-0,4	0,0
Landschaftspflegematerial	11-22	0	0	0,1-0,2	0,0
Energiepflanzen (Festbrennstoffe)	365	0	0	2,6	0,0
Summe	1.112-1.141	261-279	24-25	7,8-8,0	1,8-2,0

Da der Einsatz der Flashpyrolyse für die Entsorgung von Altholz in einem 1998 abgeschlossenen Projekt (siehe [2]) bereits erfolgreich dargestellt wurde, entschied sich die PYTEC dazu, für die Realisierung dieses Projektes Industrierestholz zu nutzen. Den Anlass zu diesem Umschwenken gab der Kontakt mit dem Sägewerk der Fa. Hagenah. Diese zeigten sich interessiert, bei der Realisierung dieser zukunftsweisenden Technologie behilflich zu sein und boten ein Areal ihres Firmengeländes als Standort für die Pilotanlage der PYTEC an.

Die Verwertung von Industrierestholz erweist sich in der Peripherie als günstiger, da auf Maschinen zur Zerkleinerung und zur Abscheidung von Störstoffen verzichtet werden kann. Um sich voll auf den wesentlichen Inhalt des Projekts, die Realisierung der 6 tato-Anlage zur ablativen Flashpyrolyse, konzentrieren zu können, erschien es in Anbetracht aller genannten Faktoren sinnvoll, die Anlage für die Verwendung von Holzhackschnitzeln der Fa. Hagenah zu entwerfen.

2.2 Zeitschiene und Projektpartner

Zurückgeworfen in der geplanten Zeitschiene wurde das Projekt immer wieder durch auftretende Schwierigkeiten in Nebenanlagen wie der Holzzuführung und der Verbrennungseinrichtung. Insbesondere traten Verzögerungen auch durch die behördlichen Auflagen bei der immissionsschutzrechtlichen Genehmigung auf, die nur durch einigen zeitlichen Aufwand zu bewältigen waren. Bis zur Ausräumung letzter Probleme bei der Inbetriebnahme der Anlage dehnte sich das ursprünglich auf 12 Monate angesetzte Projekt auf 30 Monate aus.

Da das Pyrolyseöl sich nach physikalischen und chemischen Eigenschaften von üblichen Dieselöl unterscheidet, war es Notwendig, geeignete Dieselmotoren ausfindig zu machen und an die Eigenschaften des Pyrolyseöls anzupassen. Die MBW (Motorenwerke Bremerhaven) sollte als Projektpartner an der Entwicklung geeigneter Motoren arbeiten. Da die MWB auf einen reichen Erfahrungsschatz im Motorenbau zurückgreifen kann, wurde zu Beginn des Projekts mit einer zeitnahen Realisierung geeigneter Entwicklungen gerechnet. Da die MWB jedoch nach wenigen gescheiterten Versuchen aus dem Projekt ausstieg, musste die PYTEC nach neuen Partnern und Wegen für die Entwicklung der energetischen Verwertung des Pyrolyseöls suchen. Diese Tatsachen führten zu weiteren Verzögerungen in dem ursprünglich vorgenommenen Zeitplan.

Der Prozess der ablativen Flashpyrolyse warf verhältnismäßig wenige Schwierigkeiten auf. Da einige Bauteile jedoch hohen mechanischen und thermischen Belastungen ausgesetzt werden, mussten einige schwierige Details bezüglich Konstruktion und Werkstoffen bewältigt werden (z.B. Isolierstoffe mit guten mechanischen Eigenschaften, drehende Dichtungen erforderlich). Des Weiteren erwies sich vor allem eine Onlinereinigung der Gasführenden Leitungen als notwendig.

Da die Produktausbeuten und Produktqualität bedeutend von einstellbaren Prozessparametern wie der Abschmelztemperatur oder den Aufenthaltszeiten abhängen, musste besonderer Wert auf die Mess- und Regeleinrichtungen gelegt werden. Die Ermittlung der optimalen Einstellung des empfindlichen Gleichgewichts im Reaktionsraum der ablativen Flashpyrolyse war z. T. mit erheblichem Zeitaufwand verbunden.

Die bau- und immissionsschutzrechtliche Planung der Pilotanlage war eines der umfangreichsten und zeitintensivsten Arbeitspakete. Wie bereits erläutert, sollte die Anlage auf dem Grundstück eines Sägewerks und somit in direkter Anbindung an die Biomasseaufbereitung (Hackschnitzelproduktion) aufgestellt werden. Da sich das benannte Sägewerk jedoch im Außengebiet befindet, nahm der Prozess der behördlichen Bewilligung des geplanten Vorhabens viel Zeit in Anspruch.

Durch das integrierte BHKW ist die Anlage grundsätzlich genehmigungspflichtig nach BImSchG. Da es sich bei der gegenständlichen Anlage um eine Pilotanlage handelt, konnte bei der Bewertung seitens der Behörden nicht auf Referenzanlagen zurückgegriffen werden. Die Erarbeitung, sowie die materielle Prüfung der Antragsunterlagen nahm somit für eine Anlage von so geringem Umfang verhältnismäßig viel Zeit in Anspruch.

Durch die Beantragung der Berechtigung zu vorzeitigem Maßnahmenbeginn nach § 8 a BImSchG konnte mit der Errichtung des Fundamentes und der Aufstellung erster Anlagenkomponenten bereits vor Erhalt der endgültigen Genehmigung begonnen werden. Die umfangreiche Montage und Einrichtung der Anlage konnte jedoch erst nach Erteilung der Genehmigung erfolgen, da hierbei die von der Behörde formulierten Auflagen beachtet werden müssen. Die Einrichtung und die Überprüfung der Funktionsfähigkeit der einzelnen Anlagenkomponenten konnten darauf folgend durchgeführt werden und wurden im Juni 2006 erfolgreich abgeschlossen.

3 Projektüberblick

3.1 Überblick Projektphasen

Das Vorhaben umfasste die Auslegung, Konstruktion und den Bau einer ablativen Flash-Pyrolyse-Anlage mit integriertem Dieselmotor-BHKW. Die ablative Flash-Pyrolyse erwies sich als ein im Prinzip einfacher, im Detail jedoch kompliziert handhabbarer Prozess, dessen Beherrschung einen hohen Forschungs- und Entwicklungsaufwand erforderte, sowohl auf verfahrenstechnischer, als auch auf konstruktiver Ebene.

Das Projekt umfasste folgende Phasen, die teilweise parallel abgearbeitet wurden:

- F & E Produktion von Biokraftstoff durch ablative Flashpyrolyse
    - Umfassende Versuchsreihen an der Laboranlage bezüglich Prozessparametern, Werkstoffen, Notwendigkeit und Möglichkeiten der Onlinereinigung, geeigneter Messtechnik und Automatisierung
    - Verfahrenstechnische Auslegung der geplanten Pilotanlage (Upscaling)
    - Konstruktive Auslegung der geplanten Pilotanlage gemäß den verfahrenstechnischen Erfordernissen
- F & E energetische Verwertung des gewonnen Biokraftstoffes im Dieselmotor
    - Studien zum Verbrennungsverhalten (Kraftstoffzusammensetzung und Motorentests)
    - Studien zur Standfestigkeit wichtiger Komponenten des Motors (Prüfung unterschiedlicher Werkstoffe und Beschichtungen auf Eignung und Standfestigkeit)
- Konstruktion, Fertigung, Montage und Einrichtung der Pilotanlage
    - Auslegung und Einkauf der Peripherie (Lagerung, Trocknung, Transport, etc.)
    - Bau- und Immissionsschutzrechtliche Planung und Genehmigung
    - Fertigung und Montage der angefertigten Konstruktionen
    - Einrichtung der Infrastruktur
- Inbetriebnahme der Pilotanlage
    - Überprüfung der Funktionalität der einzelnen Komponenten

- Durchführung notwendiger Änderungen und Optimierung der Verfahrenstechnik
- Durchführung notwendiger Änderungen und Optimierung der Konstruktion
- Durchführung notwendiger Änderungen und Optimierung der Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik
- Durchführung notwendiger Änderungen und Optimierung der Verbrennungsanlage
- Optimierung der Automatisierung

Im Folgenden werden die Abläufe und Ergebnisse der Phasen in drei Schwerpunkten kurz zusammengefasst.

3.2 Ablative Pyrolyse im Labormaßstab und Upscaling

Die erste Projektphase bestand im Wesentlichen aus Versuchsreihen an der PYTEC-Laboranlage. Es ging in dieser Phase zunächst um die Untersuchung, ob sich durch die ablative Flashpyrolyse ein geeigneter flüssiger Energieträger herstellen lässt, der nach seiner Qualität vergleichbar ist mit denen anderer Flash-Pyrolyse-Verfahren.

Nachdem erfolgreich demonstriert werden konnte, dass an der Laboranlage hochwertige Pyrolyseöle gewonnen werden können, trat die Verbesserung und Optimierung des entwickelten Prozesses in den Vordergrund. Es erwies sich als schwierig, ein dauerhaftes Gleichgewicht im Prozess zu erreichen, insbesondere durch Verschmutzung (z.B. Ablagerung von Koks) der Anlage, sowie durch mangelnde Standfestigkeit diverser Anlagenteile.

Im gleichen Zuge wurde besonderes Augenmerk darauf gerichtet, den Prozess mit einer umfassenden Mess- und Regelungstechnik zu versehen, da die richtige Einstellung der Prozessparameter sich entscheidend auf Qualität und Ausbeuten der Produkte auswirken.

Ausgehend von den an der Laboranlage gewonnenen Erkenntnissen und ermittelten Daten wurde in Zusammenarbeit mit dem Ingenieurbüro TEC Lüneburg die Pilotanlage entworfen und konstruiert. Besondere verfahrenstechnische und konstruktive Herausforderungen fanden sich dabei in folgenden Bereichen:

- Holz ist ein besonders schwer handhabbares Aufgabegut, da es bei Transport und Pressung extrem zum Verklemmen neigt
- Im Prozess müssen diverse drehende Einheiten mit Betriebsmitteln versorgt werden, sowie gegen die Umgebung abgedichtet werden, was konstruktive und werkstofftechnische Schwierigkeiten in sich birgt.

- In einigen Bauteilen treten prozessbedingt hohe thermisch-mechanische Belastungen auf

Im Zuge der Konstruktion wurden insbesondere bezüglich der Holzzuführung unterschiedliche Entwürfe gestaltet, deren Eignung in Versuchen überprüft wurde.

3.3 Ablative Pyrolyse im Pilotmaßstab

Nach Abschluss der Versuchs- und Konstruktionsphase zur ablativen Flash-Pyrolyse wurde mit der Realisierung der Pilotanlage begonnen. Die Konstruktion und Auslegung wurde unter der Leitung der TEC und der PYTEC vollzogen.

Die Pilotanlage besteht aus 6 Betriebseinheiten, die mobil in 5 Containern untergebracht sind:

- Lagerung (Schubbodencontainer)
- Trocknung (Trommeltrockner mit anschließender Feststoffabscheidung)
- Pyrolysereaktor inkl. Biomassezuführung
- Kondensator, inkl. Gasreinigung
- BHKW
- Schaltwarte

Die Einheiten des Pyrolysators und Kondensators wurden gänzlich von PYTEC entwickelt und ausgelegt. Für die Anlagen zur Holzlagerung und Holztrocknung wurden Standardlösungen eingekauft. Das zum Einsatz kommende BHKW ist eine marktübliche Anlage, die jedoch in vielen entscheidenden Komponenten modifiziert werden musste, um es an die Eigenschaften des Pyrolyseöles anzupassen.

Dem Ablauf der Errichtung und Installation der Anlage liegt zugrunde, dass diese im Laufe der Inbetriebnahme Änderungen und Verbesserungen unterlag, wie es bei Pilotanlagen üblich ist. So wurde die notwendige Infrastruktur ebenso parallel zur Anlagenerrichtung entwickelt und realisiert.

3.4 Energetische Verwertung der Pyrolyseprodukte

3.4.1 Kontrolle der Produktqualität

Die Produkte der Flashpyrolyse sollen im gegenständlichen Projekt energetisch verwertet werden. Ziel der ablativen Flashpyrolyse ist es, Kohle, Gas und Bioöl in einem bestimmten Mengenverhältnis zu erzeugen. Durch Einstellen der Pro-

zessparameter (z.B. Abschmelztemperatur, Aufenthaltsdauer, Anpressdruck) ist auf den Pyrolyseprozess und somit auf dieses Mengenverhältnis Einfluss zu nehmen. In der Regel hängt neben dem Mengenverhältnis ebenso die Qualität der Pyrolyseprodukte, insbesondere die des Pyrolyseöls, von diversen Prozessparametern ab.

Flüssigkeiten aus der Pyrolyse von Biomasse unterscheiden sich nach Ihren chemischen und physikalischen Eigenschaften wesentlich von üblichen auf Petroleum basierenden Kraftstoffen. Sie verfügen in der Regel über einen hohen Wasser-, Säure- und Feststoffanteil, besitzen nur etwa 50 % des Heizwertes fossiler Brennstoffe und sind bei Raumtemperatur deutlich viskoser. Ferner handelt es sich bei Pyrolyseölen um polare Flüssigkeiten mit hohem Sauerstoffgehalt, die sich bei Erhitzen instabil zeigen [3]. Diese ungewöhnlichen Eigenschaften müssen sorgfältig in Betracht gezogen werden wenn es darum geht, geeignete Methoden zur energetischen Verwertung zu entwickeln.

Für die energetische Verwertung sind insbesondere die in Tabelle 2 aufgeführten Eigenschaften von Bedeutung.

Tabelle 2: Anforderungen an die Eigenschaften von Pyrolyseölen hinsichtlich eines günstigen Verbrennungsverhaltens gemäß [8].

Eigenschaft	Angestrebter Wert	Bemerkungen
Wassergehalt	< 27 %	Gewährleistung von Homogenität und Heizwert
pH-Wert	2-3	Korrosionsvermeidung
Viskosität	> 50 cSt bei 20°C	Gangbar in Düsen und Pumpen
Feststoffgehalt	< 0,01 %	Gangbar in Düsen und Pumpen
Unterer Heizwert	>15 MJ/kg	Verwendbarkeit in üblichen Verbrennungsanlagen
Thermische Stabilität	Maximal 100 % Erhöhung der Viskosität	Bei Alterungstest 24 h bei 80°C
Homogenität	Einphasigkeit	gleichmäßige, vollständige Verbrennung möglich

Da die Qualität des Pyrolyseöls einerseits für die energetische Verwertung von großer Bedeutung ist und andererseits durch Variation der Prozessparameter leicht zu beeinflussen ist, war die stoffliche Analyse der Pyrolyseprodukte zur Kontrolle über die Dauer des gesamten Projektes von besonderem Interesse. Somit wurden sowohl während der Phase der Laborversuche, als auch während der Inbetriebnahme der Pilotanlage die Produkte der Pyrolyse von dem Projektpartner BFH stets auf ihre Tauglichkeit zur energetischen Verwertung untersucht.

3.4.2 Nutzung in Dieselmotoren

Zur energetischen Verwendung von Pyrolyseöl werden seit einigen Jahren in unterschiedlichen Verbrennungsanlagen Versuche durchgeführt. Verbrennungsversuche in Dieselmotoren wurden bereits in England (ORMROD Diesels), Finnland (Wärtsilä Diesels, VTT) realisiert [1], es kam bei diesen Versuchen jedoch nicht zu einem wirtschaftlichen Einsatz von Pyrolyseöl. Schwierigkeiten traten vor allem durch folgende Gegebenheiten auf:

- Pyrolyseöle sind durch ihren hohen Säureanteil sehr korrosive Flüssigkeiten
- Die Viskosität von Pyrolyseöl ist höher als die üblicher Dieselkraftstoffe
- Verursacht durch den Pyrolyseprozess findet sich ein hoher Feststoffanteil im Pyrolyseöl
- Pyrolyseöle verfügen über einen relativ hohen Wasseranteil
- Der Brennwert von Pyrolyseölen entspricht ca. 50 % des Brennwertes üblicher Kraftstoffe (durch die höhere Dichte des Pyrolyseöls wird den dadurch gegebenen Nachteilen etwas entgegengewirkt)

Um die erfolgreiche Nutzung von Pyrolyseöl in Dieselmotoren darstellen zu können, mussten zunächst geeignete Motormodelle gefunden werden, die trotz der unterschiedlichen Eigenschaften konstant mit Pyrolyseöl betrieben werden können. Des Weitern mussten diese Motoren den notwendigen Veränderungen unterzogen werden, um die chemischen und mechanischen Eigenschaften des Pyrolyseöls zu verkraften. Dies impliziert vor allem die Modifikation der Komponenten der Einspritzdüsen und anderen Kraftstoff führenden, belasteten Teilen, die in geeigneten Werkstoffen gefertigt, bzw. beschichtet sein müssen.

3.5 Immissionschutzrechtliche Beurteilung der Anlage

Die Genehmigung der Anlage nach dem BImSchG wurde aufgrund des integrierten BHKWs gemäß 4. BImSchV, Anhang 1.3 Spalte 2 ausgeführt. Aufgrund der Tatsache, dass es sich um eine Pilotanlage handelt, gestaltete sich das Genehmigungsverfahren hinsichtlich der behördlichen Überprüfung des Vorhabens der Anlage schwierig. Um sich gegen unvorhergesehene Dinge abzusichern, erteilte die zuständige Behörde die Genehmigung zunächst nach §2 Absatz 3, 4. BImSchV auf drei Jahre, mit automatischem Übergang in eine dauerhafte Genehmigung, sofern keine der Genehmigung entgegenstehenden Vorkommnisse eintreffen.

4 Einführung

4.1 Allgemeines zur Nutzung regenerativer Energie

Vor dem Hintergrund der auftretenden Klimaveränderungen und der anstehenden Verknappung fossiler Rohstoffe gewinnt das Thema der regenerativen Energiegewinnung immer mehr an Bedeutung. Der Anteil der erneuerbaren Energien an der Energiebereitstellung in Deutschland wächst seit Jahren stetig an. Solarenergie, Wind- und Wasserkraft, Bioenergie und Geothermie trugen im Mai 2006 4,6 % zum Endenergieverbrauch Deutschlands bei. Beim Bruttostromverbrauch haben sie 10,2 % erreicht, bei der Wärmebereitstellung 5,3 % und beim Kraftstoffverbrauch 3,6 % [12].

Die Abhängigkeit der deutschen Energieversorgung von Importen ist mit der Zeit permanent gestiegen. Sie beträgt bei Uran 100 %, bei Mineralöl nahezu 97 und bei Gas 83 %. Bei Steinkohle beträgt der Importanteil 61 %. Lediglich bei Braunkohle und bei den erneuerbaren Energien greift Deutschland vollständig auf einheimische Energieproduktion zurück [14]. Die Zahlen machen deutlich, dass Deutschland von einer autarken Energieversorgung noch weit entfernt ist. Wenn, je nach Entwicklung des Energieverbrauchs, der „mid-depletion-point“ innerhalb der nächsten fünf bis zwanzig Jahre erreicht sein wird, werden das Umdenken und Umstrukturieren weiter beschleunigt werden müssen.

Die Förderung der Unabhängigkeit von Energieimporten ist jedoch nur ein Faktor unter den vielen Gewinnen, die die Nutzung regenerativer Energieträger mit sich bringt. Der Ausbau der Nutzung regenerativer Energie bringt viele weitere positive Auswirkungen mit sich:

- Vermeidung von CO2-Emissionen / Klimaschutz
- Beitrag zur Versorgungssicherheit und Vermeidung von politischen Konflikten um fossile Rohstoffe, Absicherung gegen Energiekostensteigerung
- Keine Generierung von Altlasten (strahlender Atommüll) oder Zerstörung des Landschaftsbildes (Kohlegruben)
- Regionale Wertschöpfung, Sicherung von Arbeitsplätzen, Stärkung strukturschwacher Gebiete

4.2 Rolle der Biomasse unter den regenerativen Energien

Energiegewinnung durch Biomasse stellt unter den regenerativen Energien nur eine von vielen Möglichkeiten dar, die Versorgung zukünftig auf eine ökologisch verträgliche und von den fossilen Ressourcen unabhängige Weise zu gestalten. Da die energetische Nutzung der nachwachsenden Rohstoffe heute schon wirtschaftlich darstellbar ist (z.B. in Gegensatz zu Anlagen der Photovoltaik) wer-

den die nachwachsenden Rohstoffe gerne als Brückenlösung auf dem Weg ins Solarzeitalter angesehen.

Die Nutzung von Biomasse als Energieträger führt außerdem zu einer Wertsteigerung land- und forstwirtschaftlicher Nebenprodukte wie Stroh und Waldrestholz, so dass durch den Ausbau von Technologien der wirtschaftlichen Biomassenutzung die Stärkung ländlicher Räume erreicht wird.

Im Konzert der regenerativen Energien wird der größte Beitrag (46,2 %) durch den Einsatz fester Biomasse geleistet. Dies lässt sich vor allem auf den Einsatz von Biomasse im Hausbrand in Form von Holzpelletheizungen oder Kaminen zurückführen.

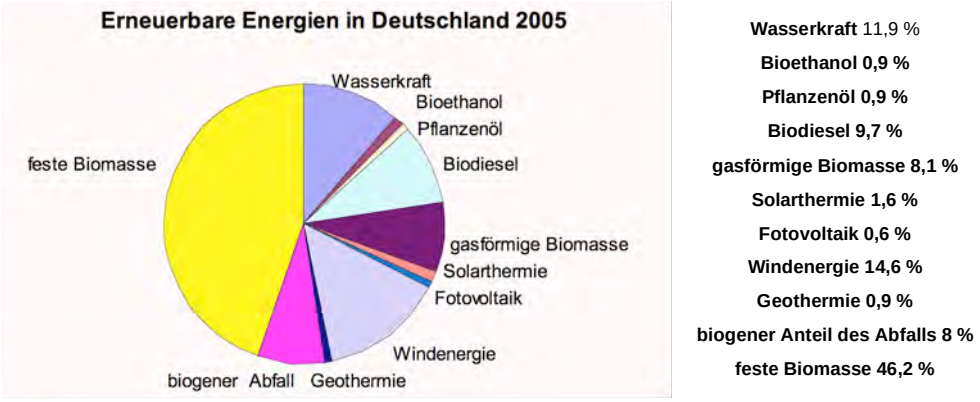


Abbildung 1 Primärenergieverbrauch und erneuerbare Energien in Deutschland 2005 (Wirkungsgradmethode), Quellen: AGEE-Stat; AG Energiebilanzen

Die aktuell bereits marktreifen Biokraftstoffe, die sogenannten Biokraftstoffe erster Generation, werden zumeist nur aus bestimmten Teilen angebauter Energiepflanzen gewonnen. Ein Beispiel hierfür wäre die Gewinnung von Rapsmethylester (Bodiesel) der nur aus den Ölsamen der Rapspflanze gewonnen werden.

Zur besseren Ausnutzung der Biomasse werden Produktionsverfahren angestrebt, die die gesamte Biomasse nutzen können. Ein Beispiel dafür sind die BtL-Kraftstoffe (Biomass to Liquid), die sich momentan in der Entwicklungsphase befinden. BtL-Verfahren basieren auf dem Prinzip, die eingehende Biomasse zunächst weitgehend zu zersetzen, um daraus anschließend einen Kraftstoff zu synthetisieren. Es dient also die gesamte Biomasse als Kohlenstoffträger egal, ob es sich um Stängel, Blätter oder Früchte handelt. Bei BtL-Verfahren ist somit der Kraftstoff-Output pro Hektar Fläche sehr hoch (nach Schätzungen der FNR liegt er bei bis zu 4.000 l/ha, womit ca. 3.900 Liter Dieselkraftstoff energetisch ersetzt werden können).

Die ablative Flashpyrolyse bietet im Vergleich zu der BtL-Technologie sogar noch weitere Vorteile: Bei der ablativen Flashpyrolyse rechnet man mit einem Konversionsgrad von nahezu 100 Prozent: 70 Prozent der Biomasse werden verflüssigt, 10 % vergast und der Rest zu Kohle mit einem gewissen Ascheanteil umgewandelt. So kann fast die gesamte in der Biomasse gespeicherte Energie in den jeweiligen Energieträgern ausgeschöpft werden. Der Prozess selbst erfordert keinen erheblichen technischen Aufwand, es werden weder hohe Drücke, noch besonders hohe Temperaturen eingesetzt, so dass des Verfahren relativ wenig Energieeinsatz benötigt.

4.3 Naturschutzbelange bei der energetischen Nutzung von Biomasse

Der ökologisch optimierte Ausbau der energetischen Nutzung von Biomasse muss den Erhalt der biologischen Vielfalt, des Naturhaushalts und des Landschaftsbildes, sowie den natürlichen Hochwasserschutz sicherstellen. Um negative Auswirkungen zu vermeiden oder zu vermindern und gegebenenfalls angemessene Ausgleichsmaßnahmen zu treffen, ist eine naturwissenschaftliche Begleitforschung der Entwicklungen unabdingbar.

Die Prämissen bei der Entwicklung und dem Ausbau der Biokraftstoffnutzung liegen besonders bei den folgenden zwei Faktoren:

- kein Raubbau
- landwirtschaftliche Bewirtschaftung gemäß der guten fachlichen Praxis

Bis 2010 soll der Anteil an Biokraftstoff bis auf 5,75 % ansteigen, wofür die benötigte Fläche aktuell auf 2 mio. ha geschätzt wird. Die Energiepflanzen sollen zunächst auf Stilllegunsflächen angebaut werden, die durch den Abbau des Überschusses in der Nahrungsmittelproduktion entstanden sind.

Gemäß der Studie “Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland”, des DLR und Ifeu [16], sind folgende Eckpunkte klar herauszustreichen:

- Ökolandbau: In der Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung ist aufgeführt, dass der Anteil des ökologischen Landbaus an der landwirtschaftlich genutzten Fläche bis 2010 auf 20 % zu steigern ist.
- Flächenversiegelung: Ein weiteres Ziel der Nachhaltigkeitsstrategie ist, die Flächeninanspruchnahme für Siedlungs- und Verkehrszwecke bis 2020 auf 30 ha/Tag zu reduzieren.
- Kompensationsflächen: Wenn beispielsweise Industriegebiete auf der grünen Wiese entstehen, werden zum Ausgleich an anderer Stelle Naturschutzmaßnahmen ergriffen. Diese Kompensationsmaßnahmen aus der sogenannten naturschutzrechtlichen Eingriffsregelung beanspruchen bisher und zukünftig nicht unerhebliche Mengen an Ackerflächen.

- Biotopverbund: Das Bundesnaturschutzgesetz fordert in § 3 die Schaffung eines länderübergreifenden Biotopverbundes, welcher der Arten- und Lebensraumerhaltung dienen und 10 % der Landesfläche umfassen soll.
- Boden- und Gewässerschutz: Aus Gründen des Boden- und Gewässerschutzes ist der Anbau von mehrjährigen Kulturen aus stark erosionsgefährdeten Flächen einem Anbau von einjährigen Kulturen vorzuziehen. Damit ergibt sich zwar eine Reduktion von “frei zur Verfügung stehenden Flächen”, andererseits aber können die mehrjährigen Pflanzen z. B. als Energiepflanzen genutzt werden.

Durch geeignete Standortwahl und einen sinnvollen Mix an erneuerbaren Energien können Auswirkungen auf Natur und Landschaft minimiert und Synergien gefunden werden. Auf diese Weise kann sowohl dem Ziel des nachhaltigen Ausbaus der erneuerbaren Energien als auch der Erhaltung der biologischen Vielfalt Rechnung getragen werden.

Die Pyrolyse, wie auch die sonstigen BtL-Technologien sind optimal dafür geeignet sich positiv auf die Biodiversität auszuwirken. In dem Verfahren können die unterschiedlichsten Biomassen verarbeitet werden, so dass der Anbau von Monokulturen nicht erforderlich ist und der Mengenertrag pro Fläche wesentlich größer ist als bei Verfahren, bei denen nur bestimmte Pflanzenteile verwertet werden können.

4.4 Verfügbarkeit nachwachsender Rohstoffe

Aktuell stehen in Deutschland von 16 Mio. ha Ackerbaufläche lediglich 1,2 Mio. ha zum Anbau von Energiepflanzen zu Verfügung. Zwei im Auftrag des Bundesumweltministeriums erstellte Biomasse-Potenzialstudien gehen davon aus, dass im Jahr 2020 bis zu 3,5 Millionen, 2030 bis zu 4,4 Millionen und 2050 bis zu sechs Millionen Hektar der Ackerflächen in Deutschland für den Energiepflanzenanbau zur Verfügung stehen. Damit lassen sich z. B. etwa 25 % des für 2020 angenommenen Kraftstoffverbrauchs hierzulande decken wenn ein Konversionsgrad 50 % zu Grunde gelegt wird [1].

Zunächst sollen Reststoffe des Biomasseanbaus genutzt werden, erst wenn dieses Potential ausgeschöpft ist, kann daran gedacht werden, Stilllegungsflächen zum Anbau von Energiepflanzen zu nutzen. Das vorhandene Potenzial wird auf etwa 360 Mrd. kWh pro Jahr eingeschätzt [15]. Dabei werden die Hauptanteile durch Energiepflanzen und Waldrestholz zu Verfügung gestellt werden.

Die aktuell am meisten verbreiteten Nutzungswege liegen im Einsatz von Biogas und Rapsmethylester, besser bekannt als Biodiesel. Beide dieser Energieträger weisen entscheidende Nachteile entweder bei der Produktion (geringe

Ausbeute bei der Produktion von Biodiesel) oder beim Einsatz (Schwierigkeiten bei der Lagerung von Biogas) auf, so dass die Entwicklung weitere Nutzungswege angestrebt werden muss. Das Ziel dieser weiteren Entwicklungen muss es sein, über ein wirtschaftlich rentables und umweltverträgliches Verfahren einen Energieträger zu produzieren, der in der Anwendung leicht handhabbar ist.

Bei einem Vergleich mit den hier dargestellten Potentialen und unter Berücksichtigung der Tatsache, dass sich die Potentiale der Energiepflanzen gegenseitig ausschließen, könnten Biobrennstoffe zwischen 10% (bei Nutzung von Waldrestholz, Stroh und Kurzumtriebsholz) und maximal 12% (Nutzung von Waldrestholz, Stroh und Miscanthus) der genannten fossilen Energieträger ersetzen. Das bedeutet, dass sich bei voller Ausschöpfung des Potentials die Energiegewinnung aus Biomasse mehr als verdoppeln lässt.

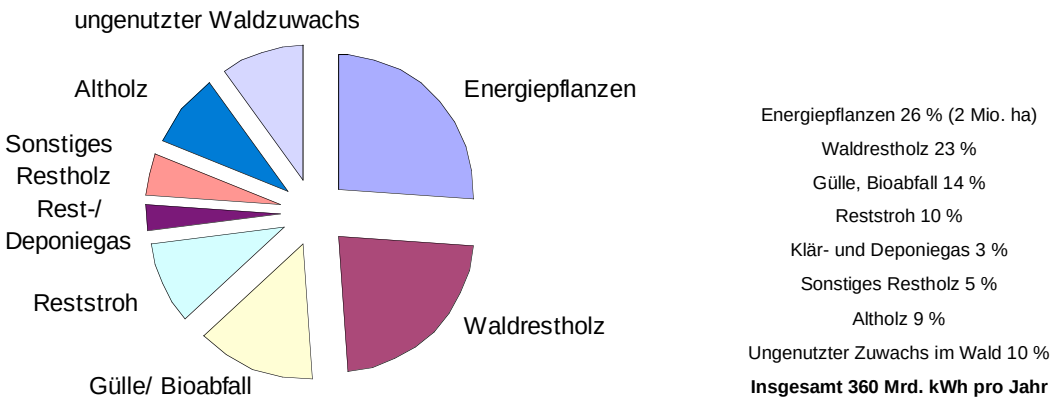


Abbildung 2: Potential biogener Treib- und Kraftstoffe in Deutschland, Quelle: DLR

5 Allgemeiner Teil

5.1 Grundlagen des Pyrolyseprozesses

5.1.1 Arten der Pyrolyse

Unter Pyrolyse versteht man die thermische Zersetzung von Stoffen in sauerstofffreier oder –armer Atmosphäre, bei der allein durch hohe Temperaturen der Bruch von chemischen Bindungen in großen Molekülen erzwungen wird. Dabei entstehen kleinere Strukturen, die eine teilweise Änderung des Aggregatzustandes des Ausgangsmaterials provozieren (Vergasung, Verflüssigung). Stärkere Bindungen wie C – C, C – H, C = O bleiben in der Regel erhalten [2].

Die Pyrolyse wird oft zur Konversion von Rest- und Abfallstoffen (Kunststoffrecycling) sowie von Biomassen eingesetzt und kann in unterschiedlichen Anlagen- und Verfahrensarten durchgeführt werden. Die determinierenden Prozessparameter sind zumeist Druck, Temperatur und Aufheizgeschwindigkeit. Bei der Pyrolyse von Holz werden stets feste, flüssige und gasförmige Produkte gewonnen. Abhängend von der Prozesstemperatur und Aufheizgeschwindigkeit, gewinnt man die Produkte in unterschiedlichen Mengenverhältnissen, so dass man, je nach Hauptprodukt, von Verkohlung, Verflüssigung oder Vergasung sprechen kann.

Die Verkohlung von Biomasse, insbesondere von Holz, ist ein Prozess, der schon seit vorgeschichtlicher Zeit zur Gewinnung von Kohle aus Holz eingesetzt wurde. In der sogenannten Meilerverkohlung wurde Holz bei einer Temperatur von 300- 350°C in einem ein- bis mehrwöchigen Verfahren in Holzkohle gewandelt. In modernen Verfahren findet die Verkohlung in mehrstündigen Verfahren bei 350 – 450°C statt. Die Holzvergasung hingegen wird in Hochtemperaturprozessen realisiert bei Temperaturen von 800 – 1300 °C und unterschiedlichen Aufenthaltsdauern. Einen Überblick über die Verfahrensarten und Prozessparameter gibt Tabelle 3.

Tabelle 3: Produktausbeuten bei unterschiedlichen Prozessführungen, Quelle: [17]

	Prozessführung		Produktausbeuten in %		
	Temperatur	Aufenthaltsdauer	Kohle	Öl	Gas
Verkohlung	350-450°C	mehrere Stunden	35	30	35
Verflüssigung	400 - 600°C	~1 s	12	75	13
Vergasung	800-1300°C	10 s - 30 min	10	5	85

Die Verflüssigung von Biomasse wird durch die schnelle Pyrolyse oder Flash-Pyrolyse erreicht. Die wesentlichen Merkmale der Flash-Pyrolyse gemäß dem aktuellen Strand des Wissens [12] sind:

- Sehr hohe Aufheiz- und Wärmeübergangsraten zur Verdampfung der Biomasse
- Gute Temperaturkontrolle im Bereich von ca. 475°C
- Schnelles Abkühlen des kondensierbaren Gasanteiles und Abscheiden der festen Produkte zur Vermeidung von Sekundärreaktionen, die zu Ausbeute und Qualitätsverlusten der Pyrolyseöle führen

In den folgenden Abschnitten wird ein Überblick über die verschiedenen Arten der Pyrolyse gegeben (Verkohlung – Verflüssigung – Vergasung) und im Speziellen auf die verschiedenen Methoden der Flashpyrolyse eingegangen.

5.1.2 Determinierende Prozessparameter

Im Besonderen beeinflussen die Temperatur, die Aufheizrate, die Verweilzeit und die Feuchte des Eintragsgutes die Reaktionen und somit die Produkte der Pyrolyse. Im Folgenden wird kurz dargestellt, welche Auswirkungen die einzelnen Parameter haben und wie der Prozess der Flash-Pyrolyse einzustellen ist um optimale Ergebnisse zu erhalten (siehe [5]).

Temperatur. Die Pyrolyse kann unter unterschiedlichen Temperaturbedingungen ablaufen. Bereits im Niedertemperaturbereich bis 200°C finden Zersetzungsprozesse, Verkohlung unter Austrieb von Gasen und Dämpfen und Wasser, statt. Bei Mitteltemperatur bis 500°C erfolgt eine erhebliche Steigerung der Reaktionsgeschwindigkeit, die höchsten Flüssigkeitsausbeuten lassen sich erzielen. Im Hochtemperaturbereich ab 500°C findet zunehmend Vergasung statt. In Abbildung 3 ist der übliche Verlauf der Produktausbeuten in Abhängigkeit der Temperatur dargestellt.

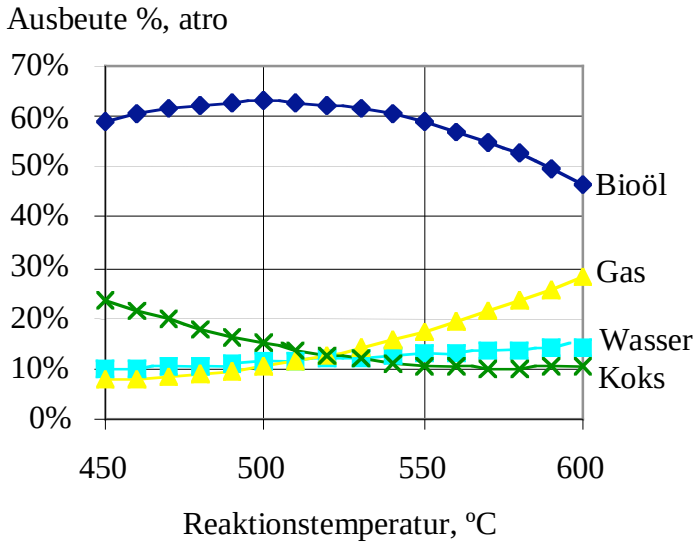


Abbildung 3: Typische Ausbeuten aus der ablativen Flash-Pyrolyse von Holz [4]

Aufheizrate. Neben der Temperatur hat ebenso die Aufheizrate (Temperaturänderung pro Zeiteinheit) entscheidenden Einfluss auf die Produktausbeuten. Sie steht in engem Zusammenhang mit der Heizmethode, Art der Wärmeübertragung und Partikelgröße. Die Pyrolyse findet statt bei Aufheizraten zwischen 0,01-1000 °C/s. Da die Größe messtechnisch nicht direkt erfassbar ist, sind exakte Aussagen über Auswirkungen schwierig [4]. Der Einfluss der Aufheizgeschwindigkeit lässt sich zurückführen auf den Einfluss der Reaktionsgeschwindigkeit und der Verweilzeit, auf die im folgenden Punkt eingegangen wird.

Reaktionszeit/Verweilzeit. Die Verweilzeit des primär gebildeten Gases innerhalb des Reaktors, genauer bis zur Abkühlung wird bei der Pyrolyse als sog. Gasaufenthaltszeit bezeichnet, deren Dauer charakteristisch für die Einordnung des gewählten Verfahrens ist (>5s langsame Pyrolyse, 2s<t<5s konventionelle Pyrolyse, <1s Flash-Pyrolyse). Die Flash-Pyrolyse zeichnet sich durch die extrem kurze Verweilzeit aus, die zum Ziel hat, möglichst nur das Stattfinden der sogenannten Primärreaktionen zu erlauben und Sekundärreaktionen zu verhindern. Als Primärreaktionen der Pyrolyse werden die Zersetzungsreaktionen des Ausgangsstoffes beim blitzartigen Aufheizen angesehen. Weitere Zersetzungsreaktionen werden als Sekundärreaktionen bezeichnet und sind in der Regel unerwünscht, da sie die Ölausbeute verringern. Diese Sekundärreaktionen können durch einen längeren Aufenthalt in heißen Reaktionsräumen, sowie durch die katalytische Wirkung organischer und anorganischer Substanzen hervorgerufen werden. Um diese Sekundärreaktionen zu verhindern ist es wichtig, die Aufheizraten zu maximieren und das in den Primärreaktionen entstehende Gas möglichst schnell aus dem Reaktionsraum zu schleusen.

Um minimale Aufenthaltszeiten zu erreichen, müssen sowohl das Abschmelzen, als auch das Ausschleusen innerhalb eines möglichst kleinen Zeitrahmens erfolgen. Dabei ist zu beachten, dass idealer Weise die Biomasse bis zum Moment des Abschmelzens auf einer Temperatur zu halten ist, die sich unterhalb der Temperatur befindet, bei der die ersten Verkohlungsprozesse stattfinden. Ebenso ist dafür zu sorgen, dass das entstehende Gas schnell abströmen kann. Das bedeutet, dass die Biomasse bei der Pyrolyse im Wirbelbett in sehr feinen Partikeln eingebracht werden muss, und bei der ablativen Pyrolyse die Biomasse in schmalen Abschnitten auf die Heizplatte zu führen ist. Der zu überwindende Weg zwischen Abschmelzen und Kondensation ist so kurz wie möglich und weitgehend frei von katalytisch wirkenden Substanzen zu halten.

Feuchte des Aufgabeguts. Die Feuchte des Aufgabegutes besitzt einen Einfluss auf die Produktqualität, da sich die Holzfeuchte letztlich im Öl wiederfindet und mit zunehmendem Anteil zu Phasenbildung führt (ab ca. 40 %wt H_2O). Unter diesen Umständen wäre eine Nachbehandlung (z.B. partielle Destillation) aufgrund der schlechten Brennwerteigenschaften und Lagerstabilität notwendig.

Weiterhin wirkt sich ein hoher Wasseranteil in der Biomasse negativ aus, da er im Pyrolyseprozess durch die Verdampfung der Feuchte zu einem erhöhten Heizbedarf führt. Lufttrockenes Holz mit 12-18 % Wassergehalt liefert Öle mit akzeptablem H_2O-Anteil von ca. 25-35 %.

Druck. Gängige Pyrolyseverfahren finden bei Normaldruck, d.h. bei ca. 1 bar und in einem inerten, d.h. nicht oxidierenden Reaktionsmedium statt, wie im Kreis geführten Produktgas oder Stickstoff. Daneben gibt es andere Verfahren, die bei erhöhtem Druck (bis 300 bar) und meist in Verbindung mit Reaktionsmedien in überkritischer oder flüssiger Phase mit deoxidierender oder hydrierender Wirkung ablaufen. Reaktionstechnisch betrachtet wirkt sich Druckerhöhung im Allgemeinen beschleunigend auf die Reaktionsgeschwindigkeit aus, da die Moleküle und damit auch die Reaktanden näher zusammenrücken. Bei spontaner Druckerhöhung nimmt aufgrund von Erwärmung zusätzlich die Brown'sche Molekularbewegung zu, was die Diffusion der Moleküle innerhalb des Reaktionsgemisches erleichtert. Sofern es sich um eine reversible Gleichgewichtsreaktion handelt, wird das Gleichgewicht bei Gasreaktionen i. d. R. zu Flüssigkeiten oder Feststoffen verschoben. Da die Zersetzungsreaktionen aber heterogener Natur und irreversibel sind, lässt sich für die primären Zersetzungsreaktionen kein Einfluss vermuten..

5.1.3 Eigenschaften und Anwendungen der Produkte

Kohle und Gas (Nebenprodukte). Die aus der Pyrolyse gewonnene Holzkohle enthält prozessbedingt zumeist auch den bei der Pyrolyse entstehenden Ascheanteil. Zusammensetzung und Menge des Ascheanteils sind abhängig von der eingesetzten Biomasse, und somit vom Gehalt der in der Biomasse gebundenen Salze. Beim Einsatz halmgutartiger Biomassen kann es zu Ascheerweichung (Schlackebildung) kommen, die sich in den meisten Fällen störend auf die und die Prozessführung auswirkt. Bei der ablativen Flash-Pyrolyse von Holz tritt diese Erscheinung nicht auf. Der anfallende Kohleanteil teilt sich auf eine Fraktion feinen Kohlestaubes und eine Fraktion grobstückiger Kohle auf.

Das Pyrolysegas ähnelt in der Regel nach Heizwert und Zusammensetzung Schwachgas. In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** sind die Analysedaten einer Probe des nichtkondensierbaren Gasanteils aus der Laboranlage der PYTEC dargestellt. Kohlenmonoxid und Kohlendioxid machen den Hauptanteil aus. Des Weiteren befindet sich Stickstoff und sonstige kurzkettige Kohlenwasserstoffverbindungen im Gas, die bei der Zersetzung der Biomasse entstehen.

Gas und Kohle, die bei der Pyrolyse entstehen, finden hauptsächlich als Energieträger Anwendung. Die Holzkohle kann jedoch auch als Aktivkohle zum Einsatz kommen.

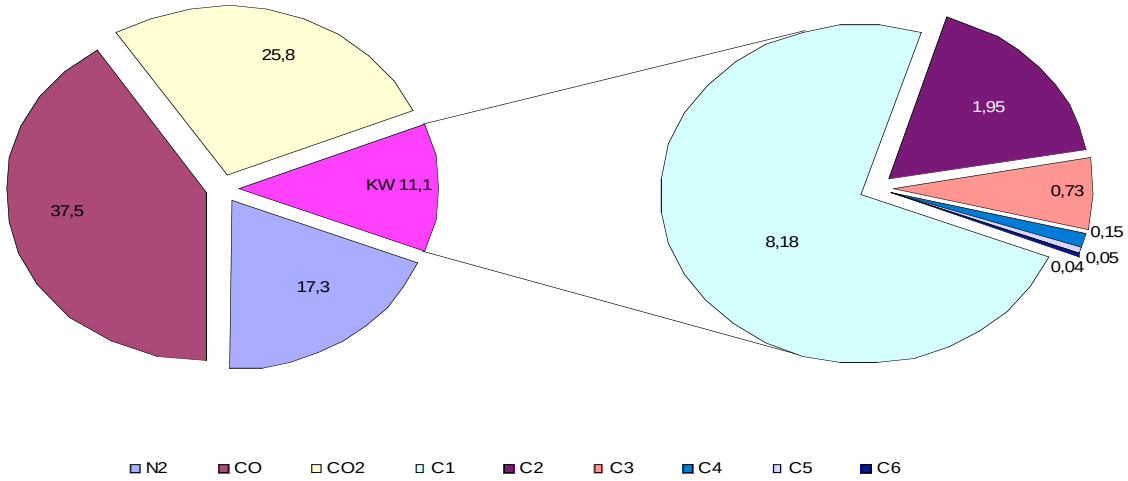


Abbildung 4: Zusammensetzung des nichtkondensierbaren Gasanteiles (Laborpyrolyseanlage PYTEC)

Pyrolyseöl. Pyrolyseöl findet sowohl als Energieträger als auch als Chemierohstoff Verwendung. Es enthält mehrere hundert verschiedene Verbindungen, von leicht flüchtigen organischen Substanzen wie Formaldehyd und Essigsäure bis hin zu komplexen hochmolekularen Phenolen und Anhydrozuckern. Ein Überblick über die quantitative Zusammensetzung gibt Tabelle 4. Die Dichte von Pyrolyseölen ist deutlich höher als die von fossilem leichten Heizöl, außerdem ist Pyrolyseöl sehr polar und somit nicht mischbar mit reinen Kohlenwasserstoffen ist.

Tabelle 4: Eigenschaften und Zusammensetzung von Pyrolyseöl aus Lignocellulose [9]

Zusammensetzung	Prozent	Hauptbestandteile
Wasser	15 – 30	Reaktionswasser ~15%, plus Feuchte
Pyrolyselignin	20 – 25	komplexer polymerer Niederschlag
Organische Säuren	5 – 10	Essigsäure („Holzessig“)
Aldehyde, Hydroxialdehyde	5 – 20	Hydroxyacetaldehyd (etwa die Hälfte)
Ketone, Hydroxyketone	0 – 10	Aceton, Hydroxyaceton
Phenole	20 – 30	Alkylguajakole, Vanillin
Methanol	~ 30	„Holzgeist“

Neben seiner Rolle als Energieträger, auf die im Abschnitt 5.4 näher eingegangen wird, sind Pyrolyseöle auch als Chemierohstoffe von Interesse. Folgenden Inhaltsstoffen wird ein Marktpotential angerechnet [10]:

- Guajakole[1]
- Syringole [2]
- Cycloten (2-Hydroxy-3-methyl-2-cyclopenten-1-on)
- 2,3-Butandion (Diacethyl)
- Maltol (3-Hydroxy-2-methyl-4H-pyran-4-on)
- Levoglukosan
- Hydroxyacetaldehyd

Die Nutzung einzelner Komponenten des Öls ist nach zahlreichen Reinigungsschritten möglich. Allerdings muss der Aufwand im vertretbaren Verhältnis zum erzielbaren Preis gehalten werden. Technisch umgesetzt wird bereits z. B. die kommerzielle Gewinnung hochreiner Essigsäure für die Computerchipherstellung oder die Isolierung von Levoglucosan als Pharmarohstoff [11]. Auch die Nutzung als Depotdünger ist von Interesse. Im großen Maßstab wird aus Pyrolyseöl bereits Flüssigrauch zur Aromatisierung von Lebensmitteln hergestellt.

5.2 Verfahren und Anwendungen der Flash-Pyrolyse

5.2.1 Überblick über Verfahrenstypen der Flash-Pyrolyse

Nachdem in voranstehenden Kapiteln die Pyrolyse im Allgemeinen behandelt wurde, soll hier ein Überblick über die unterschiedlichen Verfahren der Flash-Pyrolyse gegeben werden, wobei auf die unterschiedlichen Anlagentypen und deren Entwicklungsstand eingegangen wird. Grundlegend für alle Flash-Pyrolyse-Prozesse sind folgende Charakteristika:

- hohe Wärmeübertragungsraten
- mittlere, sorgfältig geregelte Temperatur des entstehenden Dampfes
- schnelles Abkühlen

Folgende Verfahrensarten wurden bis heute zur Realisierung der Flash-Pyrolyse erprobt [9]:

- Reaktoren mit Einsatz von Wärmeträgern

[1] Guajakol, 4-Methylguajakol, 4-Ethylguajakol, Vanillin, Isoeugenol

[2] Syringol, 4-Methylsyringol, 4-Ethylsysringol, Allylsysringol

Pneumatisch fluidisierte Reaktoren (Wirbelschichten):

- stationäre Wirbelschicht (z. B. Dynamotive, Kanada)
- zirkulierende Wirbelschicht (z. B. Ensyn, Kanada)

Mechanisch fluidisierte Reaktoren:

- Rotierender Konusreaktor (z. B. BTG, Niederlande)
- Doppelschneckenreaktor (z. B. FZK, Deutschland)

- Reaktoren mit Direktkontakt der Heizfläche:
  - Ablative Flash-Pyrolyse (z. B. PYTEC, Deutschland)
  - Vakuum- Flash-Pyrolyse (z. B. Pyrovac, Kanada)

Die Mehrheit der entwickelten Verfahren verwendet Sand als Wärmeträger. Der Sand wird dabei in der Regel durch Teilverbrennung des entstandenen Pyrolysekokses aufgeheizt.

Im Folgenden wird zunächst eine kurze Erläuterung zu den diversen Reaktortypen, die mit Wärmeträgern arbeiten, gegeben. Diese Funktionsweise dieser Reaktoren basiert auf dem Prinzip, sehr fein zerkleinerte Biomasse, in ein fluidisiertes Wärmeträgerbett (meistens Sand) einzubringen.

Vakuumreaktoren werden hier vernachlässigt, da sie nicht in relevantem Umfang zum Einsatz kommen. Auf die ablativen Reaktoren wird in den nächsten Kapiteln umfassend eingegangen.

Reaktoren mit stationärer Wirbelschicht. In Reaktoren mit stationärer Wirbelschicht wird die Biomasse in einem rund 450 bis 500 °C heißen Sandwirbelbett thermisch zersetzt. Dazu kann grundsätzlich die bekannte Wirbelschichttechnologie einschließlich der entsprechenden Zusatzaggregate eingesetzt werden, die jedoch an diesen speziellen Anwendungsfall entsprechend anzupassen ist. Die höchste mit dieser Technik erreichbare Ölausbeute (einschließlich Reaktionswasser) liegt etwa bei 75 % bezogen auf trockene Biomasse. Der optimale Temperaturbereich liegt bei 450 bis 500 °C. Derzeit befindet sich die größte Anlage dieser Art mit einer Kapazität von 100 tato Biomasse in Vancouver bei Fa. Dynamotive, Kanada. Das Verfahren ist durch den Bezeichnung Biotherm™ geschützt [12].

Reaktoren mit zirkulierender Wirbelschicht. Parallel zu Anlagen mit stationärer Wirbelschicht werden auch Anlagen mit zirkulierender Wirbelschicht in einer Größenordnung zwischen 20 kg/h und 40 tato eingesetzt. Sie haben den Vorteil, dass in derartigen Reaktoren extrem schnelle Aufheizraten und kurze Produktverweilzeiten realisiert werden können; der Prozess wird deshalb als Rapid Thermal Processing (RTP) der Fa. ENSYN vermarktet. Die größeren Anlagen sind vorwiegend zur Erzeugung von Flüssigrauch in USA in Betrieb [12].

Die größte europäische RTP-Anlage steht nahe Perugia, Umbrien, Italien bei Fa. ENEL, die im Rahmen von Forschungsvorhaben unregelmassig betrieben wird. Bei Anlagen mit zirkulierender Wirbelschicht werden die sehr fein gemahlenen Biomassepartikel mit einer Korngröße von <1 mm seitlich in die zirkulierende Sandwirbelschicht eingebracht. Gleichzeitig werden die entstehende Kohle gemeinsam mit einem Teil des Sandbettes kontinuierlich aus dem Reaktor ausgetragen. In einem ersten Zyklon wird der Sand vom Gutstrom abgetrennt und in den Reaktor zurückgeführt. Die entstandene Kohle wird in einem zweiten Zyklon separiert und zur Bereitstellung der Prozessenergie verbrannt. Die im Gutstrom befindlichen flüssigen Produkte werden über Strahlwäscher) kondensiert.

Rotierender Konusreaktor. Eine weitere Anlagenart für die pyrolytische Zersetzung der Biomasse ist der rotierenden Konusreaktor, in dem der genutzte Wärmeträger mechanisch fluidisiert wird. Das Reaktorssystem selbst besteht aus einem inneren, stationärem und einem äußeren, rotierendem Konus, der durch einen Motor angetrieben wird. Dadurch entsteht ein Spalt, in dem sich Sand und Biomasse nach oben bewegen können. Zerkleinerte Biomasse wird seitlich und vorgeheizter Sand wird von oben auf den Boden des äußeren, rotierenden Konus eingebracht. Die Feststoffe werden aufgrund der Zentrifugalkräfte an die heiße Wand des rotierenden Konus gedrückt und kriechen entlang der Reaktorwand nach oben, wobei die Biomasse pyrolysiert wird. Oben angekommen fallen Holzkohle und Sand automatisch über den Reaktorrand und werden mit einem Gebläse in eine darüber liegende Brennkammer transportiert. Dort wird die Kohle verbrannt und gleichzeitig der Sand aufgeheizt. Der heiße Sand, der allein für die Aufheizung des Reaktors zuständig ist, fällt zurück in den Konusreaktor. Die gasförmigen Pyrolyseprodukte verlassen den Reaktor seitlich, das Bio-Öl wird nach einem Strahlwäscher abgeschieden. Die Technologie der Rotating-Cone-Reaktoren wird von der Fa. BTG im Labor- und Industriemaßstab genutzt und weiterentwickelt. Die größte sich im Betrieb befindliche Anlage hat eine Kapazität von 50 tato. Sie wird in Malaysia mit Abfällen aus der Palmölgewinnung betrieben [17].

Doppelschnecken-Reaktor (LR = Lurgi Residue Reactor). Diese Form des Reaktordesigns basiert ebenfalls auf dem Prinzip der mechanischen Fluidisierung. An einem Ende wird der Wärmeträger (auch hier zumeist heißer Sand) mit dem zu pyrolysierenden Aufgabegut vermischt, heißes Gas, Pyrolysedämpfe und leichte Kokspartikel werden mit niedriger Verweilzeit aus dem Reaktor geblasen, die Koksabscheidung erfolgt in Zyklonen. Der Sand und die verbleibenden schwereren Kokspartikel werden am Ende der Doppelschnecke voneinander getrennt. Der kondensierte Dampf (Pyrolyseöl) und der Koks werden zu einem Slurry vermischt, der sedimentationsstabil und leicht zu transportieren ist. Der LR oder Doppelschnecken-Reaktor wird seit etwa 40 Jahren zur Schnellpyrolyse von verschiedenartigen Erdölfraktionen mit einem Wärmeträger wie Sand oder Koks technisch eingesetzt wird [12].

5.2.2 Realisierte Anlagen und Projekte

Tabelle 5 gibt einen Überblick über den Entwicklungsstand der unterschiedlichen Pyrolysetechnologien. Die aufgelisteten Anlagen befanden sich 2004 in Betrieb. Dabei ist zu bemerken, dass während der gesamten Entwicklung der Technologie sich bereits wesentlich mehr Anlagen in Betrieb befanden, aus wirtschaftlichen oder technischen Schwierigkeiten jedoch wieder rückgebaut wurden.

Tabelle 5: Im Betrieb bzw. Aufbau* befindliche Anlagen zur Flash-Pyrolyse von Biomasse

Organisation	Standort	Verfahren	Anlagenkapazität	Produktnutzung
Ensyn Red Arrow	United States, Wisconsin	RTP™ Transported fluidized bed	70 t/d (6 kommerzielle Anlagen in Betrieb)	Überwiegend Chemierohstoffe (Raucharomen)
Dynamotive	Canada, Ontario	BioTherm™ Bubbling fluidized bed	100 t/d	Orenda Gasturbine 2,5 MW
BTG	Netherlands	Rotating Cone Gleichstrom Brennstoffbett	50 t/d	Vergasung
PYTEC	Germany	BTO ablativ	6 t/d	Verbrennung in adaptierten Dieselmotor
FZK	Germany	Bioliq* Wirbelschicht	12 t/d	Vergasung

5.3 Die ablative Flashpyrolyse

5.3.1 Prinzip und determinierende Faktoren

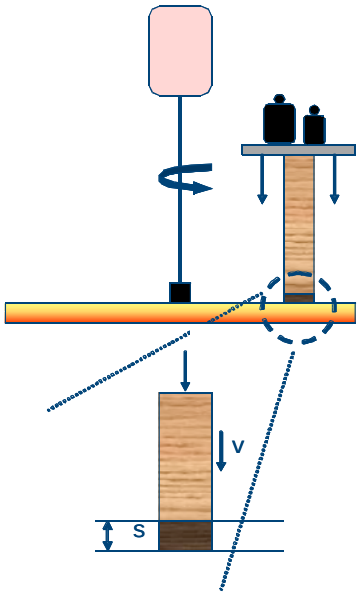


Abbildung 5: Wirkprinzip der ablativen Pyrolyse (Lédé et al. 1985,1986)

Die ablative Flashpyrolyse ist ein Verfahren, das sich von den o. g. Verfahren durch den wesentlich geringeren Energiebedarf unterscheidet. Dies ist auf zwei grundlegende Unterschiede zurückzuführen:

- Bei der ablativen Flashpyrolyse werden weder Wärmeträger noch Fluidisierungstechniken benötigt, die i. d. R. sowohl einen hohen konstruktiven, als auch energetischen Aufwand erfordern
- Die verwendete Biomasse kann grobstückig in dem Prozess verarbeitet werden, wodurch die energieaufwendige Zerkleinerung, wie sie bei den sonstigen Verfahren notwendig ist, nicht erforderlich ist

Das Grundprinzip, dargestellt in Abbildung 5, basiert auf der einfachen Idee, einen Feststoff durch direkten Kontakt mit einer heißen Oberfläche abzuschmelzen und zu verdampfen, ähnlich wie Eis auf einer Herdplatte. Dabei muss der Feststoff auf der heißen Oberfläche ständig fortbewegt werden, um das Abströmen des entstehenden Dampfes zu erleichtern und die Entstehung einer Koksschicht zwischen der heißen Fläche und dem Feststoff zu vermeiden. Durch den sich beständig bildenden Flüssigkeitsfilm ist diese Bewegung selbst bei starkem Anpressdruck reibungsarm.

Erste Veröffentlichungen über ablative Flashpyrolyse stammen von Lédé, der in seinen Versuchen wichtiges Basiswissen bezüglich der den Abschmelzvorgang beeinflussenden Parameter schuf. In seinen Versuchen ließ er Holzstäbe auf

einer heißen rotierenden Scheibe abschmelzen. Die Dokumentation seiner Versuche enthält Graphiken über den Durchmesser der Berührungsfläche des abzuschmelzenden Materials (Stabdurchmesser), den Anpressdruck des Holzes auf die heiße Oberfläche, die Temperatur der heißen Oberfläche und die Relativgeschwindigkeit von Holz und heißer Oberfläche (Rotationsgeschwindigkeit), dei im Folgenden vorgestellt werden. Unter Beachtung der Erkenntnisse von Lédé wurde die Laboranlage zur ablativen Flashpyrolyse konzipiert.

Stabdurchmesser. Der Stabdurchmesser, also der Durchmesser der Berührungsfläche von Biomasse und Heizplatte beeinflusst entscheidend die Abströmgeschwindigkeit des entstehenden Dampfes.

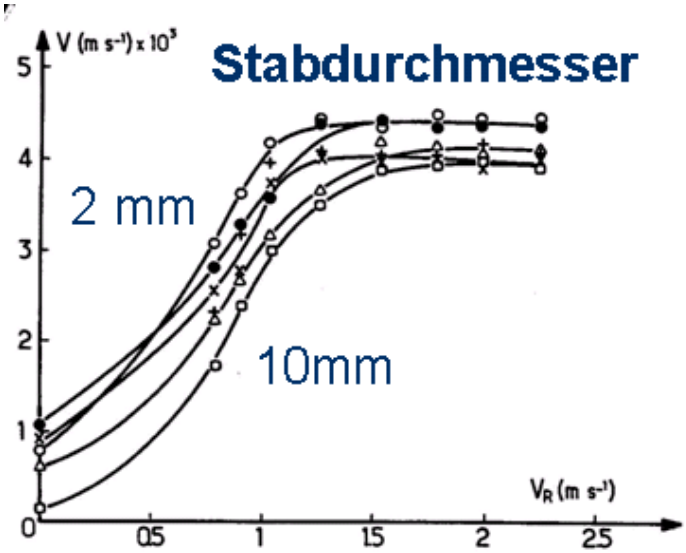
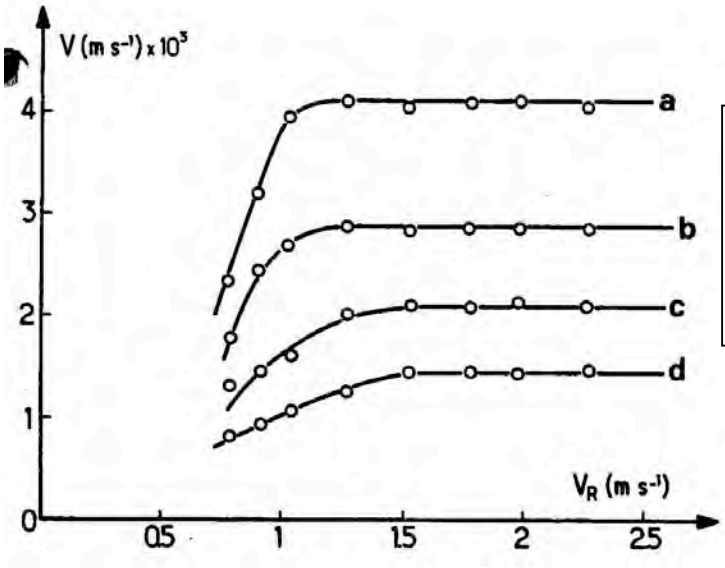


Abbildung 6: Einfluss des Stabdurchmessers (Lédé et al., Fuel 1985)

In der Graphik (Abbildung 6) ist die Abschmelzgeschwindigkeit über der relativen Rotationsgeschwindigkeit aufgetragen. Die Kennlinien beschreiben das Abschmelzverhalten von Stäben unterschiedlicher Durchmesser. Die erkennbare Tendenz ist eine Steigerung der Abschmelzgeschwindigkeit mit Verringerung des Stabdurchmessers und Erhöhung der Rotationsgeschwindigkeit. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass bei großen Durchmessern das Holz sich selbst am Abströmen behindert. Je kleiner der Durchmesser und je hoher die Rotationsgeschwindigkeit, desto besser die Konditionen für eine störungsfreie Abströmung und somit ein schnelles voranschreiten des Prozesses. Bei einer relativen Rotationsgeschwindigkeit von 1-1,5 ms^{-1} erreicht der Prozess die erreichbare Maximalgeschwindigkeit.

Für die Versuche der Laboranlage wurde die Zuführung so konzipiert, dass die Berührungsfläche der Latten mit der Heizplatte 10*47 mm beträgt. Mit diesem Maß bewegt man sich noch in einem günstigen Gebiet bezüglich des Abströmverhaltens und muss auf der anderen Seite das Holz nicht übermäßig zerkleinern.

Anpressdruck. Der Anpressdruck spielt bei der ablativen Flashpyrolyse eine Rolle, da sich mit ihm der Wärmeübergangskoeffizient verändert. Die Kennlinien in Abbildung 7 dokumentieren den Einfluss des Anpressdruckes auf die Abschmelzgeschwindigkeit. Die Kennlinien sind wie in Abbildung 6 über die relative Rotationsgeschwindigkeit aufgetragen. Auch hier ist zu beobachten, dass bei einer Geschwindigkeit zwischen 1 und 1,5 ms^{-1} das mögliche Maximum erreicht wird.



a	1,39 MPa
b	0,81 MPa
c	0,50 MPa
d	0,37 MPa

Abbildung 7: Einfluss des Anpressdruckes (Lédé et al., Fuel 1985)

Es zeichnet sich deutlich ab, dass sich mit Erhöhung des Druckes auch eine deutliche Erhöhung der Abschmelzgeschwindigkeit erreichen lässt. Für die Auslegung der Laboranlage musste hier abgewogen werden zwischen hohen Abschmelzgeschwindigkeiten, sprich hohem Durchsatz, und moderatem Material und Energieeinsatz, also nicht zu hohen Druckkräften. Der Anpressdruck betrug zu Anfang 20 – 30 bar, da die Abschmelzgeschwindigkeiten damit jedoch keine zufrieden stellenden Werte erreichten, wurde der Anpressdruck später auf bis zu 60 bar angehoben (siehe hierzu Daten Tabelle 10).

Scheibentemperatur. Wie in den bereits beschriebenen Versuchsreihen, ist auch in dieser Untersuchung die Abschmelzgeschwindigkeit über der relativen Rotationsgeschwindigkeit der Heizplatte dargestellt. Auch in dieser Versuchsreihe ist zu beobachten, dass die Werte bei einer Geschwindigkeit von 1 – 1,5 ms^{-1} nicht mehr gesteigert werden können. Die Kennlinien beschreiben Untersuchungen bei unterschiedlichen Heizplattentemperaturen. Wie aus der Graphik ersichtlich, wirkt sich die Erhöhung der Plattentemperatur positiv auf die Abschmelzgeschwindigkeit aus.

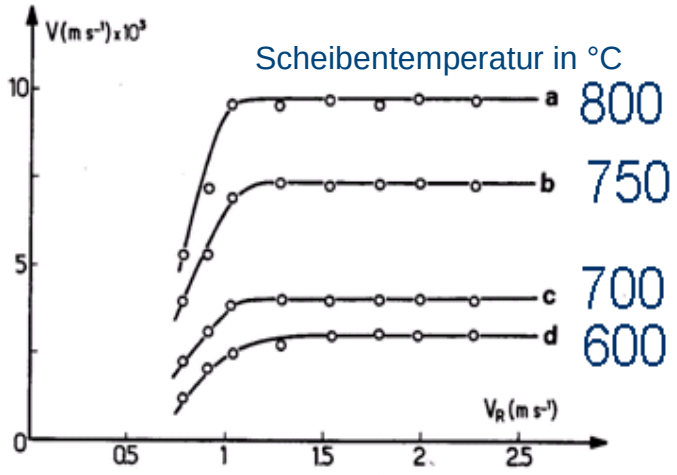


Abbildung 8: Einfluss der Temperatur (Lédé et al., Fuel 1985)

Für die Realisierung der Flashpyrolyse muss aber ebenfalls bedacht werden, dass das Verhältnis der Produktausbeute der thermochemischen Zersetzungsreaktionen bei zunehmenden Temperaturen immer weiter in die Gasphase verlegt wird. Zielt man aber auf flüssige Produkte ab, so darf man die Temperatur nicht zu weit steigern (siehe Tabelle 3).

5.3.2 Vergleichende Gegenüberstellung von Verfahrensarten

Tabelle 6: Das Verfahren der ablativen Flash-Pyrolyse im Vergleich zur Wirbelschicht [17]

Wirbelschichtreaktoren	ablative Reaktoren
– hohe Wärmeübertragungsraten – gute Durchmischung der Partikel – einfache Konstruktion, keine bewegten Teile	– Wärmeübergang durch direkten Kontakt – kein Transportgas/Wärmeträger notwendig – keine Produktverdünnung – einfache Produktabscheidung – kompaktes Design – kein Mahlaufwand – große Raum-Zeitausbeute
– kleine Partikel erforderlich (2 - 3 mm) – kleine Raum-Zeit-Ausbeute – hohe Produktverdünnung, aufwendige Produktgewinnung	– Wärmebereitstellung schwierig – komplizierte Konstruktion (bewegte und drehende Teile, abgedichtet gegen Umgebung

5.4 Energetische Nutzung von Pyrolyseöl

5.4.1 Vorteile gegenüber anderen Verfahren

Das im gegenständlichen Projekt entwickelte Verfahren setzt auf die Erzeugung eines flüssigen Bioenergieträgers, der entscheidende Vorteile gegenüber festen oder gasförmigen Energieträgern bietet. Gasförmige Energieträger sind aufgrund des schwierigen und gefährlichen Handlings (Druckbehälter, große Volumina, Explosionsgefahr) immer mit einem technischen, und somit finanziellen Mehraufwand verbunden. Feste Energieträger weisen unpraktische Transporteigenschaften (kein Transport über Pipelines möglich, geringe Energiedichten pro Volumen) und ungünstige Verbrennungseigenschaften (unvollständige Verbrennung, hohe Staubemissionen) auf. Ferner kann bei der Nutzung von Feststoffen elektrische Energie nur über den Umweg der Wärmeerzeugung zum Antrieb einer Turbine erzeugt werden.

Auch gegenüber anderen Verfahren zur Gewinnung flüssiger Bioenergieträger bietet die ablative Flashpyrolyse Vorteile. Diese liegen vor allem in der Möglichkeit der Ganzpflanzennutzung. Dies bedeutet, dass bei dem gegenständlichen Prozess, anders als bei der Bioethanolgewinnung (ausschließliche Nutzung der Cellulosehaltigen Pflanzenteile) oder bei der Pflanzenölgewinnung (ausschließliche Nutzung der Ölhaltigen Saaten), die gesamte Pflanze genutzt wird und somit eine maximale Ausbeute der Anbauflächen erzielt werden kann.

5.4.2 Verbrennungsverhalten von Pyrolyseöl

Aufgrund seiner chemischen und physikalischen Eigenschaften besitzt Pyrolyseöl grundsätzlich das Potential, energetisch genutzt zu werden. In Tabelle 7 sind die stofflichen Eigenschaften von Pyrolyseöl, sowie von leichtem und schwerem Heizöl aufgelistet, die für das Verbrennungsverhalten einer Flüssigkeit ausschlaggebend sind. Dabei ist zu beachten, dass die Eigenschaften von Pyrolyseölen stark voneinander Abweichen können, abhängig von der eingesetzten Biomasse und der angewendeten Verfahrensart. Beispielhaft sind hierzu in Tabelle 8 die Daten verschiedener Pyrolyseöle dargestellt. Bei den ENEL-Ölen und 2 handelt es sich um Öle, die in Bastardo (Italien) in einem Reaktor mit transportiertem Wirbelbett von Ensyn erzeugt wurden, ENEL 1 aus kanadischer Eiche, ENEL 2 aus Buchenholz. DYNA 1001 wurde im der stationären Wirbelschichtreaktor der Fa. Dynamotive in Kanada aus kalifornischer Kiefer gewonnen, und BTG im rotierenden Konusreaktor der Fa. BTG aus heimischem Kiefernholz.

Tabelle 7: Pyrolyseöl im Vergleich zu anderen flüssigen Energieträgern

Eigenschaften	Einheit	Pyrolyseöl	Diesel	Schweres HL
Dichte @ 15°C	kg/dm3	1.22	0.85	0.96
Molekulargewicht	kg/mol	--	170-200	--
Kinematische Viskosität @ 50°C	cStoke	13	2.5	351
Unterer Heizwert	MJ/kg	17.5	42.9	40.7
Flammpunkt	°C	66	70	100
Fließpunkt	°C	-27	-20	21
Aschegehalt	%Gew.	0.13 <	0.01	0.03
Wassergehalt	%Gew.	20.5	0.1	0.1
Elemantaranalyse				
Kohlenstoff	%	48.5	86.3	86.1
Wasserstoff	%	6.4	12.8	11.8
Sauerstoff	%	42.5	0.9	0
Schwefel	%	0	0.15-0.30	2.1

Tabelle 8: diverse Pyrolyseöle im Vergleich, Quelle: [7]

Physico-chemical properties	ENEL1 Canadian oak	ENEL2 Beech wood	Dyna1001 California pine	BTG Pine wood
Viscosity (cPoise) at 25°C	701	9.8	46.2	21.3
Viscosity (cPoise) at 35°C	361	6.7	27.1	14.7
Viscosity (cPoise) at 45°C	150	4.1	14.1	9.2
Elemental analysis (% w/w)				
H	5.79	5.94	6.31	6.18
C	44.06	34.96	43.52	44.08
O	48.68	58.70	50.07	49.64
N	0.08	0.11	0.07	0.09
S	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Alkali/BCO (ppm)				
Na	103	179	6	168
K	339	694	8	725
Ca	1096	1561	123	1498
Ash weight (% w/w)	1.38	0.28	0.03	0.29
Alkali/ash (mg g^{-1}):				
Na	7.5	64	20.5	163.7
K	24.6	248	26.9	29.8
Ca	79.4	558	410	624.3
Water weight (% w/w)	22.1[23.1][a]	43.6[45.1]	30.5[31.1]	34.4
Density at 20°C (g cm^{-3}):	1.230	1.165	1.175	1.189
pH	3.2	3.0	2.6	2.9
LHV (kJ kg^{-1})	16942	14577	16779	16090
HHV (kJ kg^{-1})	18205	15873	18155	17460

[a]Numbers in square brackets indicate water content values measured adopting the Karl–Fisher method

Durch die dargestellten unterschiedlichen Eigenschaften lässt sich die Verbindung zwischen Viskosität, Wassergehalt und Heizwert erkennen. Ein hoher

Wassergehalt im Öl führt generell zu einer Minderung der Viskosität und des Heizwertes des Öles, was aus energetischer Sicht auch dessen Wert verringert.

Die Nutzung von Pyrolyseöl als Substitut von schwerem Heizöl ist wirtschaftlich nicht interessant, als Substitut für Dieselöl hingegen ist es ein viel versprechendes Produkt. Sowohl zu Zwecken der Stromerzeugung, als auch zu Heizzwecken könnte der Biokraftstoff wirtschaftlich zum Einsatz kommen. Schwierigkeiten traten in der Praxis jedoch immer wieder durch einige störende Eigenschaften des Pyrolyseöles auf. Die Hauptprobleme lassen sich auf die hohe Viskosität, den hohen Wasser- und Säuregehalt und den niedrigen Flammpunkt zurückführen, sowie auf das Blockieren und Verkleben von Elementen der Verbrennungsanlagen, die durch Polymerisationen und Verkrustungen des Pyrolysats entstehen können.

Die Abgaswerte bei der Verbrennung von Pyrolyseöl zeigen regelmäßig verhältnismäßig hohe CO- und Staubkonzentrationen und niedrige NOx-Werte, was auf eine langsame, unvollständige und kühle Verbrennung hinweist. Diese Erscheinung lässt sich auf den hohen Wassergehalt und die Diversität der Moleküle zurückführen, die sich im betrachteten Biokraftstoff befinden.

Als Energieträger bietet Pyrolyseöl gegenüber gasförmigen oder festen Brennstoffen folgende Vorteile [8]:

- Hohe Energiedichte, bis zu 2,5 – 3fache Energiedichte von Weichholz, basierend auf dem unteren Heizwert
- Bessere Eigenschaften für Transport und Handhabung als Rohbiomasse oder Synthesegas
- Die Möglichkeit der Entkopplung von Handhabung und Nutzung biogener Festbrennstoffe, was besonders durch die gute Lagerbarkeit von flüssigen Brennstoffen gegeben ist
- Die Nutzung von Pyrolyseölen in bestehenden Heizkesseln mit leichten Anpassungen
- Zeitweiser Betrieb von Kraftwerken möglich zu Spitzenzeiten, zur Verbesserung der Stromversorgung
- Pyrolyseöle können Heizöle ersetzen, welche wie Dieselöl, mittlere Fraktionen darstellen

Tabelle 9: Eigenschaften und Emissionen nach Gust, 1997: Combustion of pyrolysis liquids [1]

		leichtes Heizöl	Pyrolyseöl	Holzhack-schnitzel	schweres Heizöl
Wassergehalt	%wt	0,02	18-25	15-20	0,5
Oberer Heizwert	MJ/kg	42,4	18-21	12-16	41
Unterer Heizwert	MJ/l	36,9	15-17	6-8	39,4
typische Emissionen					
CO	ppm	15-30	30-50	500-6000	11079
Nox	ppm	80-120	120-150	80-160	200-400
Stäube	mg/Nm³	0,2-1	2,5-5		1-4

Um einen Weg zur energetischen Nutzung in üblichen Verbrennungsanlagen zu finden, müssen also entweder die Eigenschaften des Pyrolyseöls modifiziert werden (Konditionierung, Upgrading), oder die Verbrennungsanlagen an die Charakteristika der Öle angepasst werden. Dies bedeutet z. B. eine Erhöhung des Heizwertes des Öles durch Verringerung des Wassergehaltes oder die korrosionsbeständige Beschichtung von Motorelementen wegen des hohen Säuregehalts. Beachtet werden müssen hier neben den Verbrennungseigenschaften auch die Eigenschaften bei der Lagerung und Handhabung.

5.4.3 Stand der Technik

Die energetische Verwertung von Pyrolyseölen wurde bereits in diversen Dieselmotoren, Gasturbinen, und Heizkesseln getestet. Dabei manifestierten sich, wie bereits erwähnt, stets ähnliche Probleme (Korrosion, Verkrustung, Verkleben).

Nutzung in Dieselmotoren. Wie Rudolf Diesel selbst bewies, eignen sich Dieselmotoren prinzipiell gut für die Verbrennung von auf Biomasse basierenden Ölen. Auch Pyrolyseöl wurde bereits in Dieselmotoren unterschiedlicher Hersteller getestet. Ausführliche Motorentests wurden unter anderem von Ormrod diesel (Leech, 1997), CNR Instituto Motori (Bertoli, 2001), Kansas University und MIT (Shihadeh, 1998), BTG (NL) and VTT and Wärtsilä Diesels (Solantausta 1993 und 1995), sowie von Pasquali Macchine Agricole und der Universität Kassel (Baglioni, 2001) durchgeführt. Die Motoren wurden in allen Fällen mit einem Stoffgemisch von Pyrolyseöl und einem Stützkraftstoff, meistens Dieselöl, betrieben.

Die chemische Aggressivität des Pyrolyseöls führte in allen bekannten Tests zu Problemen. Ebenso sind Lackschichten und Verkrustungen der Komponenten der Einspritzsysteme, deren Ursprünge wohl in Polymerisation oder Korrosion

liegen, regelmäßig aufgetreten. Die generelle Schlussfolgerung ist somit, dass die Verbrennung von Pyrolyseöl prinzipiell möglich ist, jedoch entweder am Brennstoff oder am Motor Modifikationen vorgenommen werden müssen, um das Bio-Crude-Oil wirtschaftlich nutzbar zu machen. Ferner ist wichtig, das Öl in einer Vorbehandlung gründlich von Feststoffen zu befreien (Dekantieren, Filtern) und Vorzuwärmen um die Viskosität herabzusetzen (siehe Daten Tabelle 8).

Nutzung in Gasturbinen und Heizkesseln. In den ersten Untersuchungen in Gasturbinen, die weit über 20 Jahre zurückliegen, traten Probleme auf, die sich auf dieselben Eigenschaften zurückführen lassen, wie die des Dieselbetriebes (Schäden durch Korrosion, durch den hohen Feststoffanteil und die hohe Viskosität). Experimente in Heizkesseln bereiteten weniger Probleme. Doch auch hier führen die genannten Eigenschaften zu Problemen, die den wirtschaftlichen Einsatz von Pyrolyseöl bis dato verhinderten.

Lagerung. Bei der Lagerung der Pyrolyse ist der hohe Säuregehalt des Mediums zu beachten. In der Regel zeigt das Pyrolyseöl bei längerer Lagerung eine Trennung in Fraktionen. Es bildet sich eine schwere, feststoffhaltige Fraktion am Grund des Lagerbehälters und eine leichtere darüber gelagerte. Bei Pyrolyseölen mit hohem Wassergehalt kann sich zusätzlich eine wässrige Phase an der Oberfläche bilden. Durch Rühren oder Umpumpen kann diese Erscheinung verhindert werden. Bei der Lagerung zeigen Pyrolyseöle Alterungserscheinungen, d.h. ein Zunehmen der Viskosität. Dieses wird durch Polymerisationen hervorgerufen, die besonders bei höheren Temperaturen (ab 50°C) einsetzen.

6 Betrieb der PYTEC Laboranlage

6.1 Zielsetzung

Zu Beginn der Arbeit der PYTEC wurde eine Laboranlage zur Erprobung der ablativen Flashpyrolyse realisiert, an der erste Erfahrungen zur Prozessführung der neuen Technologie gesammelt wurden. Die Anlage wurde basierend auf den Daten der Labor-Wirbelschicht-Pyrolyseanlage der Bundesforschungsanstalt für Holz- und Forstwirtschaft (BFH) und den Ergebnissen von Lédé [18] entwickelt. Mit wissenschaftlicher Unterstützung der BFH wurde so der weltweit erste ablative Flash-Pyrolysereaktor gebaut. Das Grundprinzip dieser Anlage ist das Anpressen des Pyrolysegutes an eine heiße Scheibe, die in einem sauerstofffreien Reaktionsraum rotiert. Dabei schmilzt und verdampft die Biomasse in Sekundenbruchteilen. Mit diesem Verfahrensprinzip erreicht man mit einem einfachen und ökonomischen Reaktordesign sehr gute Wärmeübertragungsraten [19]. Der Laborreaktor, der von der PYTEC seit 2003 betrieben wird, wurde auf einen Durchsatz von 16 kg Holz pro Stunde ausgelegt.

Als Standort wurde die Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg, Campus Bergedorf gewählt, wo eine gute Zusammenarbeit mit dem Fachbereich Verfahrenstechnik besteht. Ziel der Arbeit an der Laboranlage war zunächst die Demonstration der Machbarkeit. In den darauf folgenden Studien wurden die Basisdaten für das Upscaling der Anlage erarbeitet. Dazu mussten die determinierenden Parameter untersucht werden, Werkstoffe getestet werden und das Reaktordesign basierend auf der Laboranlage entworfen werden. Auf den gewonnenen Erkenntnissen basierend wurde von PYTEC in Zusammenarbeit mit TEC Lüneburg eine 6-12 t/d Pyrolyseanlage entwickelt und konstruiert.

6.2 Beschreibung der Laboranlage

6.2.1 Überblick über die Verfahrensschritte

An der Laboranlage der PYTEC werden Holz und aktuell auch andere Biomassen durch einen thermochemischen Prozess zu Öl, Kohle und Gas konvertiert. Sowohl das Hauptprodukt Öl, als auch die Nebenprodukte Holzkohle und der Gasanteil werden bei den Versuchsreihen mengenmäßig erfasst und in regelmäßigen Abständen nach ihrer Zusammensetzung analysiert.

Im gegenständlichen Projekt wurden die Versuchsreihen mit Buchen- und Fichtenholz durchgeführt. Das Holz wurde in Form Latten, die auf das Maß 47x10x300 zugesägt waren, in die Anlage eingebracht.

In Abbildung 9 sind schematisch die Verfahrensschritte im Grundfließbild der Anlage dargestellt. Zur Gewinnung des Öls werden die folgenden vier Hauptschritte realisiert:

- Pyrolysieren der Biomasse an der heißen drehenden Scheibe
- Abscheidung der Feststoffe
- Kondensieren des Primärgases durch Quenchen in einem Sprühturm
- Trennen von Produkt und Quenchmittel durch Ausnutzung des Dichteunterschieds, sofern zum Quenchen andere Stoffe als Pyrolyseöl genutzt wurden
- Abscheiden von Aerosolen und Partikeln aus dem Sekundärgas mit Hilfe eines Elektrofilters (nicht kondensierbare Anteile des Pyrolysats)

Das Pyrolyseöl wird in einem Vorlagebehälter gesammelt und nach Bedarf in Lagerbehälter abgepumpt. Probenahmen erfolgten zunächst aus dem Vorlagebehälter. Um die Durchmischung der Öle verschiedener Probeläufe für die Analytik zu vermeiden, wurde in einer späteren Versuchsphase ein sogenannter Sideslip installiert, über den bei jedem Versuch einzelne Proben gezogen werden konnten.

Die entstehende Holzkohle wird bei der ablativen Flash-Pyrolyse in zwei unterschiedlichen Fraktionen gewonnen. Zunächst fällt im Reaktor ein Anteil grober Kohlestücke an, die durch eigene Schwerkraft auf den Boden des Reaktorgehäuses fallen und von dort ausgeschleust werden können. Der Anteil an feinem Kohlestaub, der bei der ablativen Pyrolyse auftritt, wird mit dem Gasstrom mitgerissen und muss über einen Zyklon abgeschieden werden.

Der nichtkondensierbare Gasanteil wird als Sekundärgas bezeichnet. Nach Passage des Elektrofilters, ist er weitgehend frei von Partikeln und Aerosolen. Das Gas durchströmt daraufhin eine Gasuhr, um die Erstellung um Massenbilanzen der Versuchsreihen zu ermöglichen. Vor der Verbrennung über einen Bunsenbrenner wird das säurehaltige Gas in einem Wäscher mit Natronlauge neutralisiert.

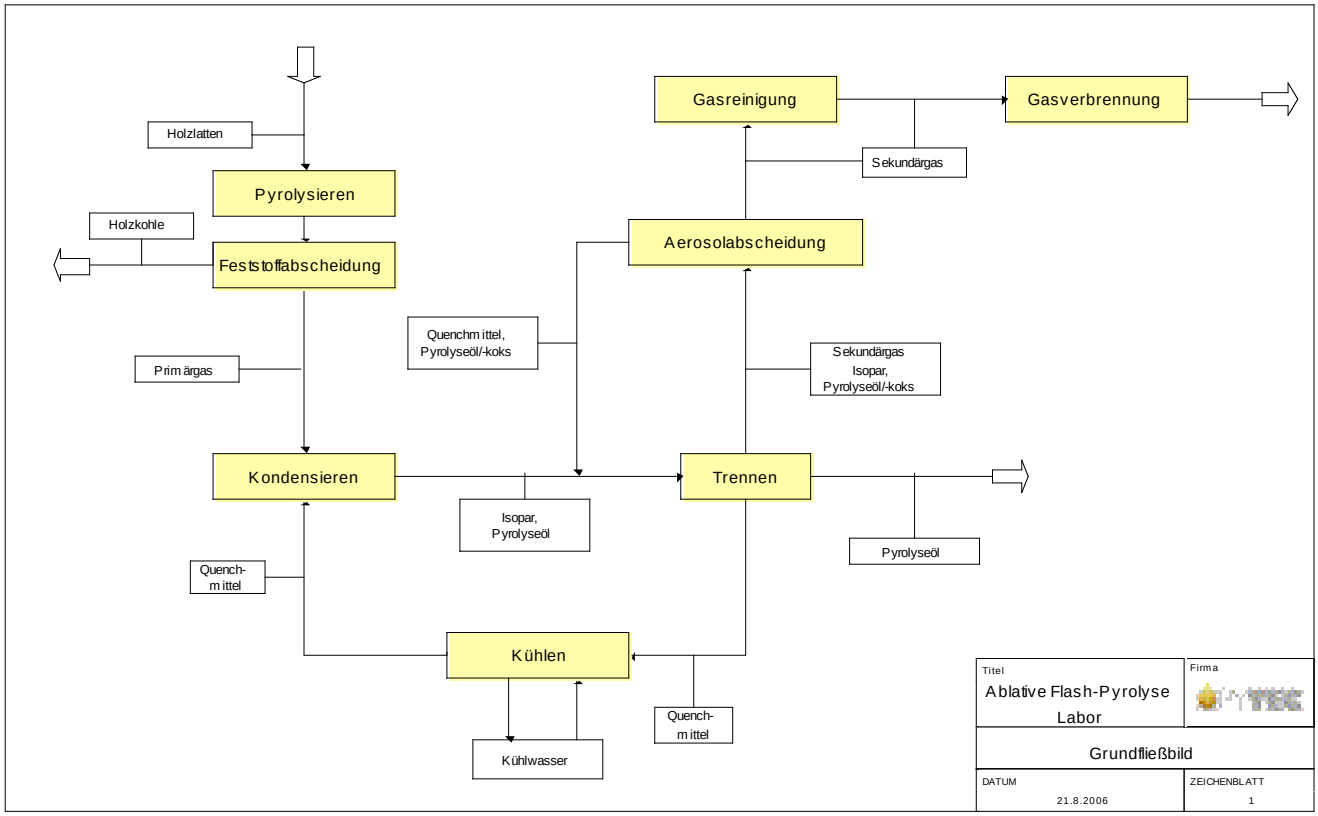


Abbildung 9: Grundfließbild

6.2.2 Detaillierte Anlagenbetriebsbeschreibung

Die Zuführung der Holzlatten (siehe Abbildung 10) erfolgt über vier Pneumatikzylinder (1) und daran verschraubten Kolbenstangen (2). Die durch Schwerkraft taktweise herabrutschenden Latten aus dem Magazin (4) werden über Zuführkanäle (3) durch sogenannte Mundstücke an die Heizscheibe (5) gedrückt. Die vier Mundstücke haben mit 47 mm x 10 mm (plus Aufmaß) genau jene Innenabmessung, die zur reibarmen Zuführung der Holzbrettchen zur Heizplatte notwendig ist.

Die Abmessungen der Latten wurde so gewählt um einen optimalen Mittelweg zu gehen zwischen den Zielen, die Biomasse in nur geringem Masse zu zerkleinern (geringer Energieaufwand bei der Präparation der Biomasse), das entstehende Gas jedoch bei der Abströmung in möglichst geringem Maße zu behindern (Vermeidung von Sekundärreaktionen).

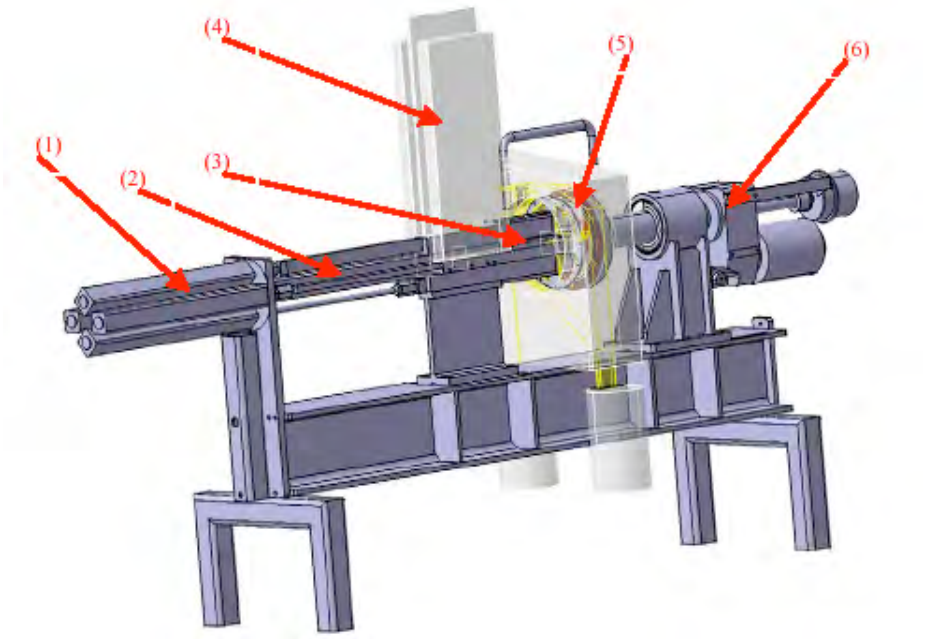


Abbildung 10: PYTEC Laboranlage für die ablative Flash-Pyrolyse [20]
1 Pneumatikzylinder, 2 Zuführstäbe, 3 Zuführkanäle, 4 Magazin, 5 Heizplatte, 6 Antriebs- und Getriebeeinheit

Die Mundstücke sind rotationssymmetrisch mit einer ihrer schmalen Seiten zum Mittelpunkt hin angeordnet, so dass die Heizfläche möglichst großflächig ausgenutzt wird. Durch die Antriebs- und Getriebeeinheit (6), die über stufenlose Drehzahlregelung und Drehmomentaufnahme verfügt, wird das eigentliche Herzstück der Anlage, die Heizplatte (5), angetrieben. Die zum Aufheizen erforderliche elektrische Energie wird über Schleifkontakte durch den Kern der Welle zur Heizplatte geleitet. Die Scheibe selbst besteht aus einem Metallstempel (7), der, zur formschlüssigen Aufnahme und Abstützung des flach-zylindrischen Wärmeisolationskörpers (8) und der Heizplatte (2), am Wellenstumpf aufgeschweißt ist. Die gesamte Platte dreht sich im entsprechenden Ausschnitt des eigentlichen Reaktorgehäuses (9), wobei Schleifringe für die Abdichtung des Systems sorgen.

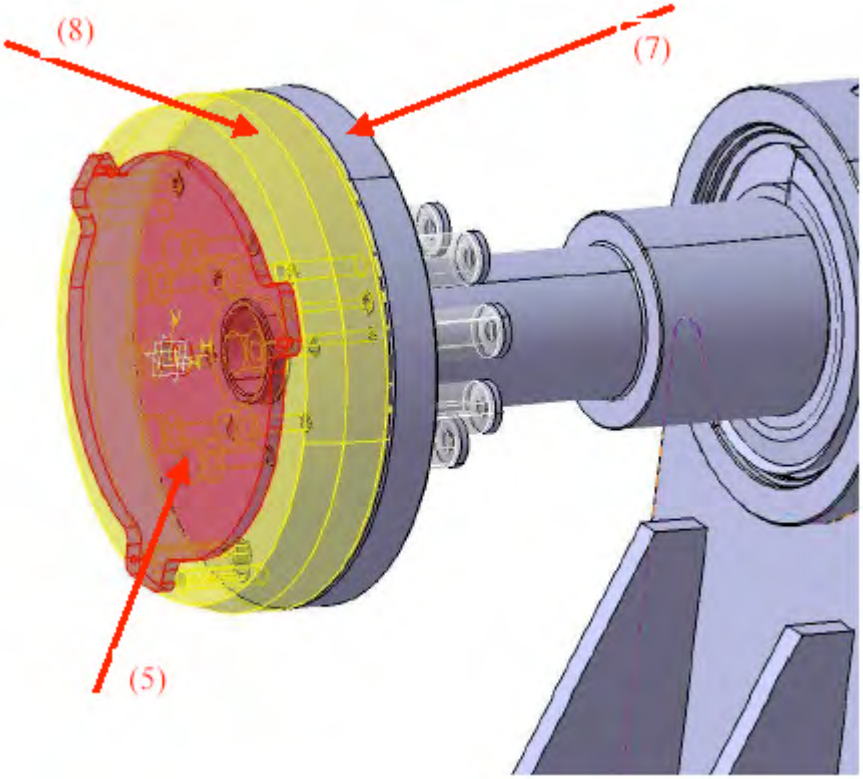


Abbildung 11: Heizplatte der PYTEC-Laboranlage [20] 5 Heizplatte, 7 Metallstempel, 8 Wärmeisolationsplatte

Das entstandene Primärgas wird über einen Zyklon von Feststoffpartikeln der Größe bis 4 µm befreit und über eine beheizte Ableitung (12) dem Kondensationsprozess zugeführt. Die vom Zyklon abgeschiedenen Partikel fallen in den Auffangbehälter A (11). Im Zuge des Prozesses entstandene Kohlerückstände, die aufgrund ihrer Größe durch den Gasstrom nicht befördert werden können, setzen sich in Auffangbehälter B (10) ab.

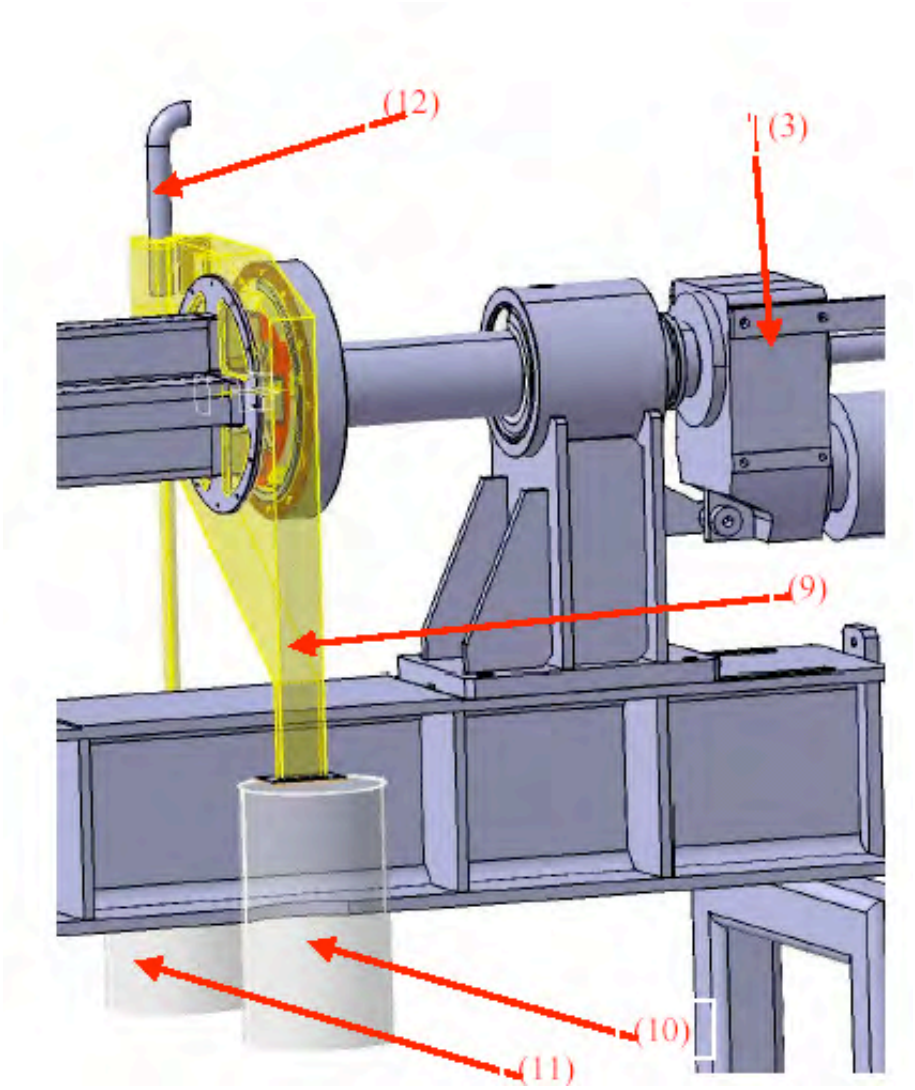


Abbildung 12: Reaktor der PYTEC-Laboranlage [20]
3 Motor- und Getriebeeinheit, 9 Reaktorgehäuse, 10 Auffangbehälter B, 11 Auffangbehälter A, 12 Ableitung

Direkt hinter der Ableitung ist ein Sprühkondensator angebracht, der durch ringförmig angebrachte Düsen ein gekühltes Quenchmittel in den Gasstrom spritzt und damit auf einer Distanz von wenigen Zentimetern das bis dahin noch gasförmige, etwa 500°C heiße Pyrolyasat blitzartig auf etwa 40°C abkühlt. Der größte Teil des Primärgases wird in dieser Einheit zu einer ölartigen Flüssigkeit kondensiert. Der nichtkondensierbare Anteil, das sogenannte Sekundärgas wird im Anschluss in Elektrofiltern nachgereinigt (Abscheidung von Aerolsolen, etc.). Daraufhin wird das Gas nach Durchströmen eines Wäschers in einer Gasfackel verbrannt.

Abbildung 13: PYTEC Laborreaktor (ohne Side-Slip)

6.3 Ziele der Prozessführung

Neben dem Beweis der Machbarkeit der ablativen Flashpyrolyse mussten am Laborreaktor auch die Verfahrenseinstellungen untersucht werden. Um optimale Produktausbeuten bei möglichst geringem Energie- und Rohstoffeinsatz zu erhalten, mussten die Prozessparameter genau untersucht und aufeinander abgestimmt werden. Wie bereits unter 5.1.2 beschrieben, ist bei der ablativen Flashpyrolyse im Wesentlichen darauf zu achten, dass Sekundärreaktionen vermieden werden. Diese können sowohl durch lange Aufenthaltszeiten in heißen Bereichen, als auch durch katalytische Vorgänge provoziert werden. Alle Anlagenteile und Vorgänge, die auf diese Faktoren Einfluss nehmen können, wurden in der Versuchsphase untersucht. In Abbildung 14 ist schematisch der Zusammenhang der Einflussnehmenden Faktoren dargestellt.

Jedes der dargestellten Pakete stellt ein Untersuchungsfeld da, das während dieses Projektes angerissen, jedoch aufgrund des kurzen Zeitfensters in einigen Fällen nicht abschließend untersucht werden konnte. Es besteht noch viel Bedarf, die Einflüsse einzelner Parameter genau zu prüfen, um das Verfahren weiter optimieren zu können.

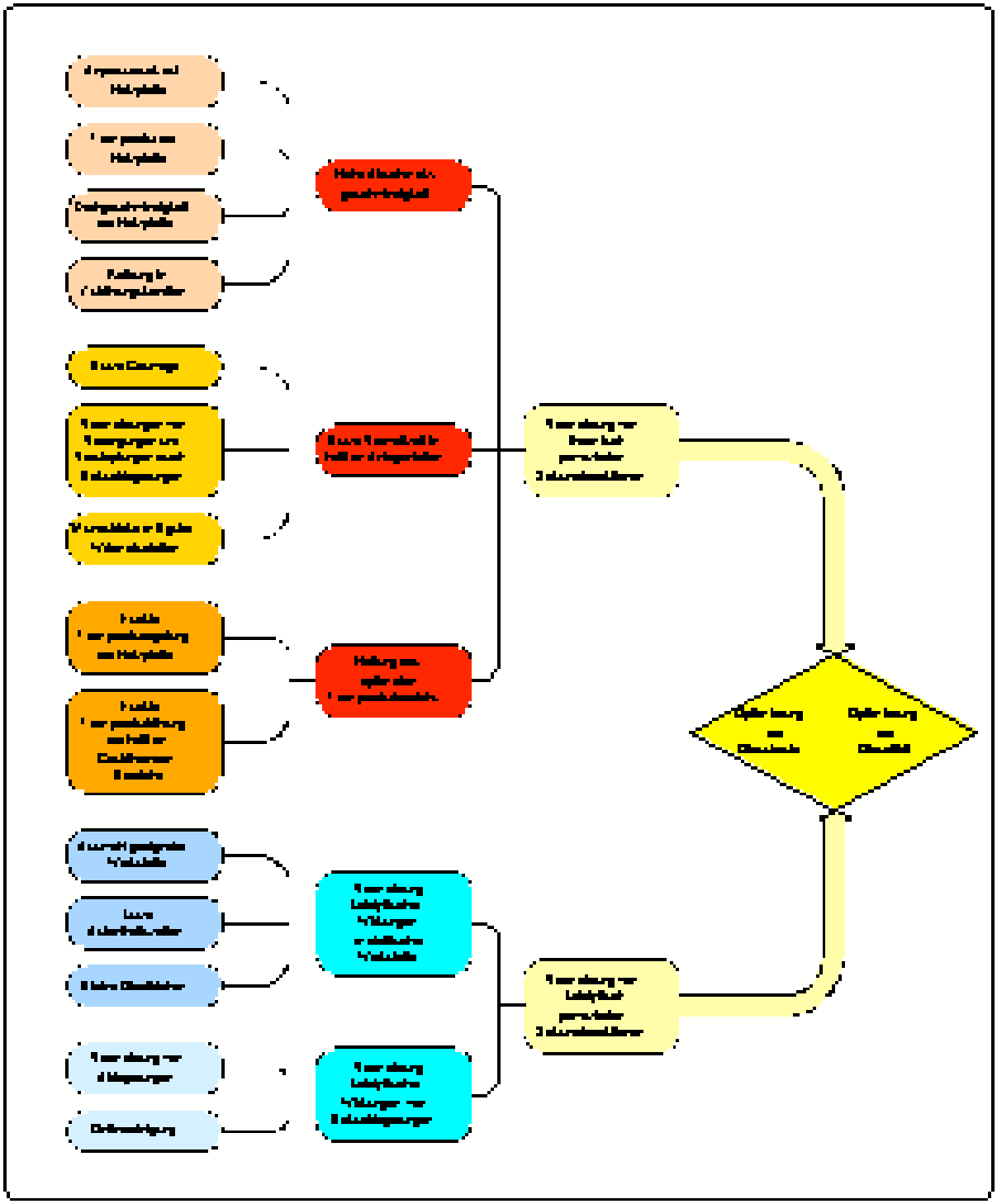


Abbildung 14: Überblick über wichtige Parameter der ablativen Flashpyrolyse

6.3.1.1 Vermeidung von thermisch provozierten Sekundärreaktionen

- Hohe Abschmelzgeschwindigkeit

  Das Abschmelzen und Verdampfen muss in Sekundenbruchteilen erfolgen. Wird das Holz zu langsam erhitzt, so entsteht eine höhere Ausbeute an Gas und Kohle. Im Laborreaktor wurden die hohen Abschmelzgeschwindigkeiten durch einen hohen Anpressdruck und eine hohen Temperatur der Heizplatte realisiert.

  Da Kohleschichten den Wärmeübergang von Heizplatte zu Biomasse erheblich verschlechtern, ist die Drehbewegung der Heizplatte von großer Bedeutung. Durch die Rotation der Heizscheibe wird der Aufbau einer Koksschicht vermieden, und das Abströmen des entstehenden Gas/Flüssigkeitsfilmes erleichtert. Dabei ist darauf zu achten, dass die Wandreibung der Biomasse in den Zuführkanälen nicht zu hoch wird (z.B. durch Niederschlag klebrigen Kondensates), um nicht zu große Energieverluste bei der Zuführung zu verzeichnen.

- Kurze Verweilzeit in heißen Anlagenteilen

  Die wichtigste Maßnahme zur Minimierung der Verweilzeiten ist die Realisierung kurzer Gaswege und die Vermeidung von Toträumen durch das konstruktive Konzept der Anlage. Dabei ist darauf zu achten, dass es in den Gaswegen nicht zu Verstopfungen durch Feststoffablagerungen kommt, da durch diese das Primärgas zu lange in den heißen Anlagenteilen zurückgehalten würde.

  Ebenso muss auch die Verweilzeit der Biomasse vor dem Abschmelzen betrachtet werden. Durch Mundstücke mit guter Wärmeisolation sollte erreicht werden, dass die Biomasse bis zum Eintritt in den Reaktor möglichst kühl bleibt und somit keine Verkohlung einsetzt, die zu einer Reduktion der Produktausbeute führen würde. Für die Laboranlage konnten jedoch keine Isolierwerkstoffe gefunden werden, die der thermisch-mechanischen Belastung auf Dauer standhalten konnten. Aus diesem Grund wurde dazu übergegangen, die Mundstücke aus Edelstahl zu fertigen. Eine stärkere Erhitzung der Zuführkanale wurde in Kauf genommen.

- Haltung des optimalen Temperaturbereiches

  Wie unter 5.1.1 beschrieben, hängen die Produkte der Pyrolyse stark vom Temperaturbereich des Prozesses ab. Um die angestrebte Produktausbeute und –qualität zu erhalten, ist eine exakte Temperaturregelung der Heizplatte, sowie der heißen Gasführenden Bereiche unbedingt notwendig. Dies erforderte einen hohen Mess- und Regelungstechnischen Aufwand. Insbesondere die Regelung der Heizplattentemperatur erwies sich in den Anfängen als schwierig.

6.3.1.2 Vermeidung von katalytisch provozierten Sekundärreaktionen

- Vermeidung katalytischer Wirkungen durch metallische Werkstoffe

Da einige Metalle, wie z. B. Nickel, die unerwünschten Sekundärreaktionen durch katalytische Wirkung begünstigen, ist darauf zu achten, diese Werkstoffe in den Gasführenden Teilen zu vermeiden. Ebenso ist auch für dieses Prozessziel die Verweilzeit möglichst zu minimieren und die Oberflächen, die mit dem Primärgas in Berührung kommen, sind durch die geschickte Anlagenkonstruktion möglichst klein zu halten.

- Vermeidung katalytischer Wirkungen durch Koksablagerungen

Ebenso wie einige Metalle besitzt Kohle ebenfalls die Eigenschaft Sekundärreaktionen im Pyrolysegas hervorzurufen. Besonders die Ablagerungen des feinen Kohlenstaubes, der dazu neigt, sich in den Gasführenden Rohren abzusetzen, besitzen eine große Oberfläche über die das Gas hinwegströmt. Die Ablagerungen der Feinkohle sind also nicht nur störend aufgrund der entstehenden Verstopfungen, sondern ebenso störend aufgrund ihrer unerwünschten chemischen Wirkung. Da sie schlecht zu vermeiden sind, muss zumindest dafür gesorgt werden, dass Sie durch eine Onlinereinigung regelmäßig entfernt werden.

6.4 Verfahrenstechnische Schwierigkeiten und Erkenntnisse

Im Betrieb der Pilotanlage wurde herausgearbeitet, wo im Prozess der ablativen Flash-Pyrolyse Schwierigkeiten auftreten und wie diesen beizukommen ist. Weiterhin war es ein wichtiges Ziel, in unterschiedlichen Versuchsreihen die optimale Einstellung der Prozessparameter herauszufinden. Als Grundlage dienten hier die in Abschnitt 5.3.1 beschriebenen Erkenntnisse von Lédé.

In den folgenden Abschnitten werden, aufgeteilt nach Anlageneinheiten, die im Laborbetrieb gewonnenen Erkenntnisse beschrieben und Ihre Relevanz für die Auslegung der Pilotanlage aufgezeigt.

6.4.1 Holzzuführung

Die Holzzuführung des Laborreaktors, in dem auf Maß gesägte Latten verarbeitet werden, unterscheidet sich wesentlich von der Holzzuführung der Pilotanlage, die mit Holzhackschnitzeln beschickt wird. Aus diesem Grund konnten aus dieser Anlageneinheit z. T. keine Erkenntnisse für die Großanlage gewonnen werden. Die Erprobung der Zuführung, wie sie in der Pilotanlage realisiert wurde, musste deswegen in einer separaten Versuchseinrichtung (siehe 7.3.3) durchgeführt werden.

6.4.1.1 Konzept der Beschickung

Die Beschickung aus den Magazinen durch die schmalen Zuführkanale erwies sich als weniger zuverlässig als erwartet. Immer wieder kam es zu Verklemmungen von Hölzern, die den Betrieb aufhielten. Diese Verklemmungen wurden in erster Linie durch Hölzer mit Übermaß, bzw. Formfehlern oder Verschmutzungen in der Anlage hervorgerufen. Durch konsequente Prüfung der einzelnen Hölzer (was einen hohen Zeitaufwand bedeutete) und gründliche Reinigung aller Rückstände nach jedem Versuch konnten die Verklemmungen weitgehend vermieden werden.

Für das Konzept der Großanlage konnten hieraus jedoch keine Erkenntnisse gewonnen werden, da dort aufgrund der Andersartigkeit des Aufgabegutes (Hackschnitzel) ein grundlegend anderes Konzept entworfen werden musste.

6.4.1.2 Kondensatbildung

Bei einigen Versuchsreichen, insbesondere mit Fichtenholz, kam es zu starker Kondensatbildung in den Zuführkanälen, d. h. ein Teil des bei der Pyrolyse entstehenden Gases ist nicht durch den Zyklon abgeströmt, sondern in die Zuführkanäle gelangt. Grund dafür scheint ein unzureichender Unterdruck im Reaktionsraum sein. Das Kondensat schlug sich an den Kanalwänden nieder und verursachte dort Verklebungen. Solange die Kanalwände durch den Anlagenbetrieb noch warm waren, konnte der Prozess meistens stabil weitergefahren werden. In manchen Fällen kam es jedoch zu so starken Verklebungen, dass die Reibung durch die Verklebungen eine weitere Holzzufuhr unmöglich machte. Nach Abkühlen war in jedem Falle eine gründliche Reinigung notwendig, um die Zuführung wieder gangbar zu machen die Anlage ohne Verklemmungen in Betrieb nehmen zu können.

Bei der Pilotanlage bereitet diese Erscheinung keine Probleme, da die Zylinder hier hydraulisch betrieben werden. Im Falle einer Verklebung kann diese durch Ausnutzen der vorhandenen Kraftreserven gelöst werden. Eine Kondensatbildung in den Kanälen, wie sie bei der Laboranlage aufgetreten ist, ist bisher jedoch noch nicht beobachtet worden.

6.4.1.3 Mundstücke der Zuführkanäle

An der Laboranlage wurden isolierende Mundstücke vorgesehen, die die aus Stahl gefertigten Zuführkanäle von dem heißen Reaktionsraum thermisch trennen sollen. Das Ziel dieser Trennung ist es, die Zuführkanäle so kühl wie möglich zu halten. Dies soll verhindern, dass Verkohlungsprozesse der Biomasse bereits beginnen, bevor sie in den Reaktor gelangt und auf diese Weise die erreichbare Ausbeute vermindert wird.

Abbildung 15: Mundstück mit Metallrahmen

Da diese Mundstücke gleichzeitig einer hohen thermischen, sowie einer hohen mechanischen Belastung (drehende Heizplatte) ausgesetzt sind, konnten keine wärmeisolierenden Werkstoffe gefunden werden, die eine akzeptable Standfestigkeit zeigten. Zunächst wurde versucht, die Mundstücke mit Edelstahlrahmen zu verstärken. Da jedoch auch diese Variante den Bruch der Mundstücke nicht langfristig verhindern konnte, wurde dazu übergegangen, die Mundstücke vollständig aus Metall zu fertigen. Es konnten keine wesentlichen negativen Einflüsse auf Produktqualität und Produktausbeute festgestellt werden, so dass die angedachte Wärmeisolierung an dieser Stelle nicht zwingend notwendig erscheint.

6.4.2 Reaktor / Heizplatte

Hinsichtlich der Gestaltung des Reaktionsraumes, sowie der Heizplatte konnten an der Laboranlage wesentliche Erkenntnisse für die Pilotanlage gewonnen werden, da die Ausführungen auf demselben Konzept basieren.

6.4.2.1 Reaktorgehäuse

Der Innenraum des Reaktorgehäuses, in dem die Pyrolyse stattfindet, ist zu minimieren, um die Verweilzeit des entstehenden Primärgases möglichst kurz zu halten. Aus diesem Grundsatz ergab sich das Design des Reaktorgehäuses, welches die drehende Scheibe eng umschließt. Lediglich der Boden des Reaktors ist mit einer Schräge und somit mit unerwünschtem Totraum versehen (siehe Abbildung 16), um den Austrag der Grobkohle auf einfache Art gewährleisten zu können.

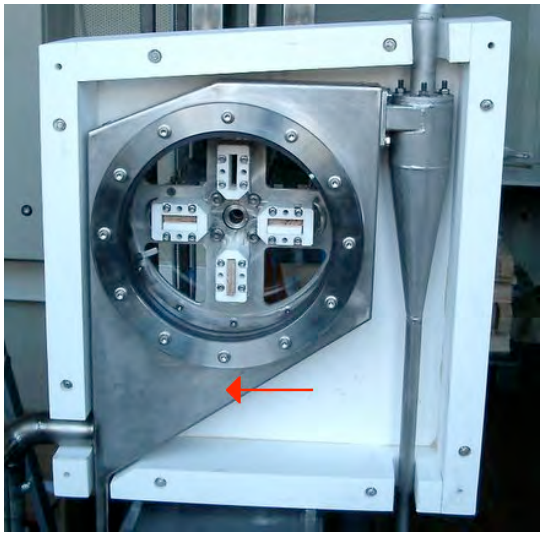


Abbildung 16: Totraum zur Realisierung des Kohleaustrags aus dem Reaktor

Im Nachhinein wurde der Reaktionsraum weiter minimiert, indem der Totraum am Rand und in der Mitte des Reaktionsraumes mit Isoliermaterial so weit wie möglich ausgekleidet wurde (Siehe Abbildung 17 und Abbildung 18).

Abbildung 17: Reaktor ohne Isoliermaterial

Abbildung 18: Reaktor mit Isoliermaterial zur Minimierung des Reaktionsraumes

6.4.2.2 Rotierende Heizscheibe

Die rotierende Scheibe der Laboranlage wird elektrisch beheizt. Realisiert wird dies durch einen Heizdraht, der in eine spiralförmige Nut an der Heizscheibe rückseitig eingebracht wird. Die Vorteile bei der Nutzung einer elektrischen Beheizung sind die relativ unkomplizierte Regelbarkeit und der geringe konstruktive Aufwand.

Die erste Version der Heizplatte wurde aus Keramik gefertigt, die Beheizung erfolgte über eine integrierte Spirale aus metalldotierter Keramik. Bei Nutzung der Keramikplatte traten jedoch diverse Schwierigkeiten auf. Zum einen konnten die Lötstellen zur Versorgung des Heizleiters der Belastung nicht standhalten, zum anderen erlitt auch die Keramikplatte selbst durch die thermische und mechanische Belastung Brüche.

Das verbesserte Folgemodell der Heizscheibe wurde von der Fa. Thermocoax aus dem Werkstoff Inconel 600 (>70 % Nickel/Kobald, >10 % Cr, <10 % Eisen) hergestellt. Der Heizdraht wurde in eine rückseitig eingefräste Nut eingelassen. Das erste Modell erhielt einen Heizdraht, der spiralförmig von außen nach innen bis zur Mitte der Platte gewickelt wurde. Bei dieser Ausführung kam die Platte bereits beim ersten Funktionstest zu Schaden, da sich der mittige Bereich überhitzte, und der Heizdraht Schaden nahm. Das nächste Modell verfügte im Grunde über dasselbe Heizprinzip, der Heizdraht wurde jedoch nicht bis zur Mitte verlegt, sondern lässt in etwa einen Kreis mit Ø 100 mm frei. Da während des Pyrolyseprozesses auf diesem Bereich der Platte keine Wärme abgenommen wird (siehe Abbildung 19), wirkt sich der unbeheizte Bereich nicht negativ auf den Prozess aus.

Abbildung 19: Bereich der Wärmeabnahme auf der Heizplatte, erkennbar durch die Schleifspuren des Holzes

Auch die Stromzuführung, und somit die Regelbarkeit der Heizung wurde im laufe der Versuche modifiziert und verbessert. Zu Beginn wurde der Heizstrom über einen Thyristor beschickt, angesteuert von einem Regler der Fa. Eurotherm. Die Temperaturregelung bei dieser Version lag ausschließlich im An- und Abschalten der vorgegebenen Spannung von 400 V. Mit diesem recht grob arbeitenden System war zum einen die Regelung der Heizplattentemperatur unzureichend, zum anderen wurden die Heizelemente durch den stark wechselnden Belastungszustand übermäßig beansprucht. Eine bessere Lösung wurde gefunden durch den Einsatz eines Reglers der Fa. Iumo (Imago), der über einen IPC-Steller eine modulierte Spannung im Bereich zwischen 0 und 400 Volt realisiert. Die Regelbarkeit der Temperatur sowie die Standzeiten der Heizsegmente konnten dadurch wesentlich erhöht werden.

Die letzte Verbesserung, die an der Platte vorgenommen wurde, war eine Variation des eingesetzten Werkstoffes. Da nach aktuellen Erkenntnissen Nickel katalytische Wirkung für die unerwünschten Sekundärreaktionen zeigt [21], wurde nun eine Platte aus nickelfreiem Stahl angefertigt. Ergebnisse bezüglich der Auswirkung auf die Produktqualität liegen noch nicht vor.

6.4.2.3 Druckregelung des Reaktors

Für die Prozessführung im Laborreaktor ist es von großer Bedeutung, einen beständigen leichten Unterdruck von 0,5 bis 1 mbar aufrecht zu erhalten. Durch diesen Unterdruck wird das schnelle Abströmen des entstehenden Primärgases gewährt. Wird der Unterdruck zu gering und somit die Aufenthaltszeit des Primärgases höher, besteht die Gefahr unerwünschter Sekundärreaktionen.

Ebenfalls ist jedoch auch zu beachten, dass der Unterdruck im Reaktor nicht zu groß werden darf, da sonst an verschiedenen nur schwach dichtenden Stellen (z.B. Zuführkanäle, Schleifringdichtungen) Leckluft aus der Umgebung in die Anlage gezogen werden kann. Da Sauerstoff bei den im Reaktor herrschenden Temperaturen zu Verbrennungsreaktionen führen würde, ist das Eindringen von Umgebungsluft unbedingt zu vermeiden.

Bei der Einstellung eines konstanten Unterdrucks zeigten sich unter Anderem Probleme, da dieser ständig in Einklang mit der Gasproduktion zu bringen ist. Durch die Nachfüllvorgänge und die natürlich gegebenen Unterschiede der Beschaffenheit der Biomasse ist eine konstante Gasproduktion in dieser Anlage nicht realisierbar (wird einer der Kanäle neu befüllt, so verringert sich die Gasproduktion temporär um 25 %).

Der notwendige Unterdruck wurde erst über Wasserstrahlpumpen erzeugt, die in Saugkraft und –volumen nicht verstellbar sind. So entstanden oft Probleme durch Druckschwankungen in der Anlage. Die Wasserstrahlpumpen wurden daraufhin durch einen regulierbaren Kohlelamellenverdichter der Fa. Becker ersetzt, wobei die die auftretenden Druckschwankungen durch eine regelbare Teilrückführung des Sekundärgases erfolgt.

6.4.3 Zyklon / Überströmrohr

Unerwartete Schwierigkeiten zeichneten sich ab in den Gaswegen zwischen Pyrolyse- und Kondesationsraum. Es kam immer wieder zu Verstopfungen der Verrohrung durch Ablagerungen von feinsten Kohlepartikeln sowie Kondensat in den kühleren Teilen.

Die Ablagerungen von Kohlepartikel bereiteten vor allem am Eingang zum Zyklon Schwierigkeiten. Aufgrund der Strömungsverhältnisse setzte sich dieser innerhalb einer Stunde soweit zu, dass das entstehende Gas am Abströmen gehindert wurde. Abbildung 20 f. zeigen den Eingang des Zyklons, sauber und nach 1 Betriebsstunde. Auch im Rohr bildeten sich an der Wand Ablagerungen die ein langsames zuwachsen bewirkten. Auf verschiedenen Wegen wurde versucht, die Verstopfungen während des Betriebes zu beseitigen:

- Änderung der Strömungsverhältnisse im Zykloneingang

  Um das abströmende Gas besser zu führen und Gaswirbel, die eventuell zum Absetzen der Kohle führen zu vermeiden, wurde am Zykloneingang ein Trichter aufgesetzt. Folgeversuche zeigten, dass durch diese Maßnahme zwar eine Verbesserung, jedoch keine genügende Lösung erzielt wurde. Im schmalen Teil des Zykloneingangs kam es weiterhin nach einer gewissen Versuchsdauer zu Verstopfungen.

- Einblasen von Stickstoff

  Als weitere Maßnahme wurde mit Druck Stickstoff durch den Zykloneingang geblasen, um die Ablagerungen fort zu tragen, doch auch diese Einrichtung führte zu keinem positiven Ergebnis

- Rütteln/Bürsten am Zykloneingang

  Zur Säuberung des Zykloneingangs wurden schließlich Druckluftapparate am Gehäuse des Zykloneingangs befestigt, die bei anstehender Druckluft Schüttelbewegungen durchführen. Betreibt man die Schüttler in Regelmäßigen abständen, so kann durch die verursachten Vibrationen das Zuwachsen des Zykloneingangs verhindert werden.

Um das Zuwachsen des Überströmrohres zu vermeiden, wurden folgende Maßnahem ergriffen:

- Änderungen des Rohrdurchmessers und der Rohrführung

  Zunächst wurde der Rohrabschnitt, der zwei Krümmer umfasste, durch einen flexiblen Messingschlauch mit größerem Rohrdurchmesser ersetzt, so dass der Gasstrom keine starke Krümmung passieren muss. Diese Maßnahmen zeigten jedoch keine zufrieden stellenden Ergebnisse.

- „Molchen“ des gesamten Überströmrohres

Der wichtigste Bestandteil der Reinigungseinrichtung ist eine Eigenentwicklung, die ähnlich wie ein Molch während des Betriebes in regelmäßigen Abständen den Zyklon und das Überströmrohr bis hin zum Kondensatoreingang reinigt.

Am Eingang des Kondensators lagert sich kondensiertes Primärgas ab, welches, sofern es nicht abgereinigt wird, den Rohrausgang zusetzt. In Abbildung 22 deutet der Pfeil auf den Rohrdurchmesser und demonstriert somit, wie weit das Rohr durch Koksablagerungen zugesetzt wird. Zur Vermeidung dieses Phänomens wurden ebenfalls unterschiedliche Formen des Kondensatordeckels getestet, zu guten Ergebnissen führte jedoch nur der Einsatz der konzipierten Reinigungsspirale.

Abbildung 20: Zykloneingang sauber

Abbildung 21: zugesetzt mit Kohlestaub

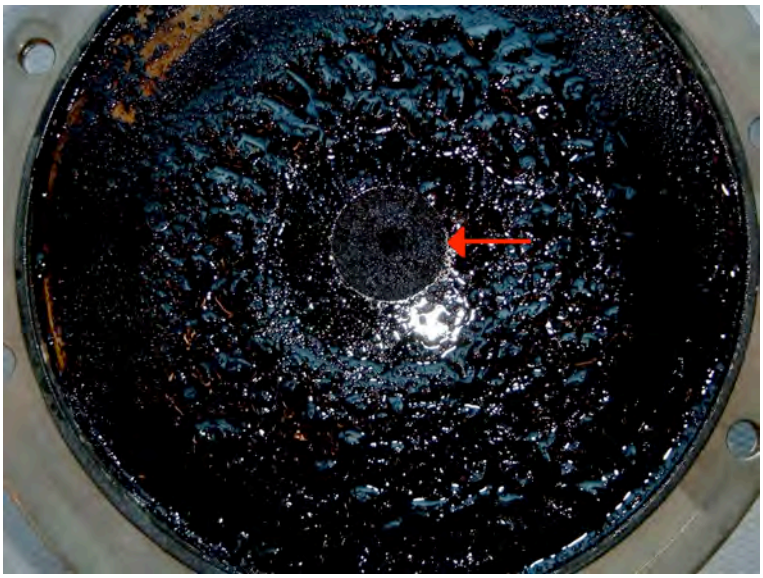


Abbildung 22: Ausgang des Überströmrohres, zugesetzt mit kondensiertem Primärgas

6.4.4 Kondensation

Zu Beginn des Betriebs der Laboranlage wurde als Quenchmittel das Isoparaffin Isopar V genutzt. Während des Quenchens wird das Isopar durch Düsen fein zerstäubt, um dem Primärgas eine große Kondensationsoberfläche bereitzustellen. Als nachteilig erwies sich dabei, dass eine Emulsion aus Isopar und Pyrolyseöl entsteht, die sich nur schwer wieder vollständig trennen lässt. Um die Bedingungen zur Trennung zu verbessern, wurden in den Vorlagebehälter Schwallbleche eingebaut, die die Strömung im Behälter beruhigen sollen.

Ein weiterer Nachteil der Sprühkondensation ist die unter 6.4.3 beschriebene Verkokung am Eingang des Kondensators. Aufgrund der angesprochenen Schwierigkeiten wurde ein alternatives Kondensationsverfahren erprobt, das in anderen Pyrolyseanlagen bereits im Einsatz ist. Das Pyrolysegas wird hierbei mit Isopar im Gleichstrom durch eine Bodenkolonne geleitet. Da sich auf den Böden hierbei jedoch ebenfalls starke Koksablagerungen bildeten (siehe Abbildung 23), die sich durch ihre katalytische Wirkung negativ auf die Ölausbeuten auswirken können, wurde von diesem Kondensationsverfahren wieder abgesehen.

Abbildung 23: offene Bodenkolonne, zugewachsen mit Pyrolysekoks

Später wurde dazu übergegangen mit dem Pyrolyseöl selbst zu quenchen. Aufgrund der höheren Viskosität muss zwar ein größerer Druckverlust hingenommen werden, man umgeht jedoch das Problem, die fein miteinander vermischten Flüssigkeiten wieder zu trennen. Die Koksablagerungen treten in gleichem Maße auf wie beim Quenchen mit Isopar.

6.5 Analysen und Ergebnisse

6.5.1 Regelung und Messung des Pyrolyseprozesses

Zur Realisierung, Kontrolle und Datenerfassung für das Upscaling des Pyrolyseprozesses war die Ausarbeitung eines anspruchsvollen Mess- und Regelsystems notwendig. Über die Dauer des Projektes wurden 49 Versuchsläufe realisiert und ausgewertet, wobei die Mess- und Regelungstechnik zunehmend erweitert und verbessert wurde. In Tabelle 10 sind die Auswertungen der Messungen einiger Versuche in einem Überblick zusammengestellt. Die dargestellten Daten wurden in den Versuchen kontinuierlich aufgenommen. Bei den in der Tabelle vermerkten Werten handelt es sich um Mittelwerte der einzelnen Versuche. Die Tabelle enthält die Messdaten, die für die Bewertung der Produktausbeute relevant sind. Weitere Messungen, die für die Überwachung des Prozesses von Bedeutung sind, sind nicht in der Übersichtstabelle enthalten, werden aber in den folgenden Abschnitten ebenfalls erläutert.

6.5.1.1 Temperaturmessung und -regelung

Die Temperaturen der Heizplatte und der Gas führenden Teile wurden über 6 unabhängig voneinander ansprechbare Regelkreise eingestellt (Reaktorgehäuse, Zyklon, Überströmrohr, Kondensatorkopf, Probenahme). Diese Aufsplittung erwies sich als notwendig, da die einzelnen Anlagenbereiche unterschied-

lichen Wärmebedarf aufweisen, um die gewünschte Temperatur halten zu können. Die Überwachung der Temperaturen der Heizplatte T_{Heiz} und der heißen Gasführenden Anlagenteile T_{Reak} (Reaktorgehäuse), T_{Zykl} (Zyklon) und T_{Kopf} (Kondensatorengang) war insbesondere wichtig, um die Erhaltung der notwendigen Prozesstemperatur zu kontrollieren.

Die Aufnahme der Temperaturen der Quenchflüssigkeit T_{Qein} und T_{Qaus}, und des Kühlwassers T_{H2Oein} und T_{H2Oaus}, in Zusammenhang mit den Volumenströmen V_{Quen} und V_{H2O}, geben Auskunft über die Wärmemengen, die abgenommen werden müssen, und somit über die bereitzustellenden Kühlwassermengen. Die Ermittlung dieser Daten war für das Upscaling unabdingbar.

6.5.1.2 Messung und Regelung des Gasdruckes

Stabile und geregelte Druckverhältnisse innerhalb der Anlage sind für den konstanten Prozess unbedingt notwendig. Aus diesem Grund wird sowohl am Reaktor, als auch im Quenchturm und Auffangbehälter der Druck überwacht. Da der Druck jedoch nur für die Stabilität des Prozesses wichtig ist, sich jedoch nach Einschätzungen nicht direkt auf die Produktausbeuten auswirkt, sind diese Werte in Tabelle 10 nicht enthalten.

Die in der Tabelle beschriebenen Versuche wurden noch unter Verwendung von Wasserstrahlpumpen zur Realisierung des geforderten Unterdruckes durchgeführt. Die Ersetzung der Wasserstrahlpumpen durch einen regelbaren Kohlelamellenverdichter, über den gemeinsam mit einem pneumatisch gesteuerten Regelventil der Volumenstrom der Prozessgase geregelt wird, führte zu einer wesentlichen Verbesserung der Stabilität des Prozesses.

6.5.1.3 Auswertung des Durchsatzes

Die Abschmelzgeschwindigkeit, und du somit der Durchsatz, hängt nach Versuchen von Lédé vom Anpressdruck und der Plattentemperatur ab. Zur Untersuchung, wie auf den Holzdurchsatz und die Ölausbeute Einfluss genommen werden kann, wurden die Heizplattentemperatur T_{Heiz}, der Anpressdruck $p_{1/2}$ und $p_{3/4}$, das Reibmoment M_{Reib} und die Heizleistung (Wärmeabnahme) $P_{Heizung}$ aufgenommen.

Die Temperatur der Heizplatte wurde stets zwischen 610 und 670 °C gehalten. Detaillierte Untersuchungen über das exakte Temperaturoptimum konnten aus Zeitgründen in diesem Projekt nicht realisiert werden.

Der Tabellenwerte $p_{1/2}$ und $p_{3/4}$ geben die Drücke bzw. die Kräfte an, mit denen die Holzlatten an die heiße Scheibe angepresst wurden. Es kommt zu der Unterscheidung zwischen Stempel 1/2 (senkrechte Stempel) und Stempel ¾ (waagerechte Stempel) aufgrund der unterschiedlichen Querschnitte. Das Reibmoment, das durch das Anpressen der Biomasse an die rotierende Heizscheibe entsteht, hängt dierekt von der Höhe des Anpressdruckes ab.

Die abgenommene Leistung der Heizplatte $P_{Heizung}$ lässt direkte Rückschlüsse auf den Wärmeübergang von Platte zu Biomasse ziehen, und weiterführend somit auf die erreichte Abschmelzgeschwindigkeit und den Durchsatz.

Ein interessantes Beispiel für die Zusammenhänge der Prozessparameter ist der Versuch AP 33, bei dem eine Heizleistung von 4.519 W (maximaler Durchschnittswert der aufgeführten Versuchsdaten) auftrat, bei der relativ geringen Heiztemperatur von 614°C. Dieses kann auf die hohen Wärmeübergangsraten, die durch die hohen Anpresskräfte entstehen (1405 und 2626 N) erklärt werden. Bei dem Versuch konnte ein Holzdurchsatz von 10,38 kg /h erreicht werden.

Insgesamt konnte der angestrebte Durchsatz von 16 kg/h nicht erreicht werden, das aufgrund der Anlagentechnik eine weitere Steigerung der Anpressdrücke nicht möglich war.

Da die Versuche an der Laboranlage aufgrund der schwierig handhabbaren Druckverhältnisse oft instabil abgelaufen sind, können auf Basis der Versuchsergebnisse keine eindeutigen Aussagen getroffen werden, welche Parametereinstellung sich positiv auf Produktausbeute und –qualität auswirken. Durch Störfälle wie Verstopfungen mussten Unterbrechungen im Prozess hingenommen werden, die z. T. großen Einfluss auf die Produktausbeute und -qualität haben (Verlängerung der Aufenthaltszeiten, Verschlechterung des Wärmeübergangs durch Bildung von Koksschichten, etc.). Mit der detaillierten Erarbeitung der Optimierungsdaten konnte erste nach Verbesserung der Druckregelung begonnen werden.

Über die Versuche gemittelt, liegt die Ölausbeute bei ca. 60 %, was in anbetracht der der genannten auftretenden Störfälle ein sehr zufrieden stellendes Ergebnis ist.

Nr.	Dauer h	Holz kg/h	T_{Heiz} °C	T_{Reak} °C	T_{Zykl} °C	T_{Kopf} °C	V_{Quen} l/h	$T_{Q,ein}$ °C	$T_{Q,aus}$ °C	V_{H2O} l/h	$T_{H2O,ein}$ °C	T_{H2Oaus} °C	$p_{1/2}$ bar;N	$p_{3/4}$ bar;N	M_{reib} Nm	$P_{Heizung}$ W	Öl kg
AP 14	1:03	8,39		458	483		470						20,4	31,5	14,5	3.898	6,58
AP 17	1:20	8,53					590						24,3	31,6	14,2	4.176	7,00
AP 20	2:30	9,92		471	478		622						26,3	32,6	10,8	3.658	15,50
AP 21	1:18	9,98		492	497		640						26,9	33,9	14,2	4.037	7,00
AP 23	0:51	7,24		503	502		666						23,3	27,4	12,9	3.227	4,80
AP 24	0:41	8,90		503	513		674						25,2	30,0	15,4	3.288	3,72
AP 25	1:02	8,38		498	506		671						25,3	30,0	11,9	3.708	5,42
AP 26	1:23	8,76		504	493		733						25,4	29,9	13,3	3.550	6,49
Mittel	**1:16**	**8,76**		**490**	**496**		**633**						**24,6**	**30,8**	**13,4**	**3693**	**7,06**
AP 27	0:42	8,59		511	463		600	20,4	31,7	200	6,8	16,3	26,6	29,7	18,1	3.340	3,82
AP28(4)	0:42	9,19		513	419		611	21,8	30,3	245	7,7	15,6	0	2358	21,4	3.117	2,51
AP28(6)	0:52	7,94		518	-		585	26,8	40,1	245	7,7	18,2	1101	2524	30,8	3.398	5,19
AP 28	1:34	8,50		516	437		596	24,6	35,7	245	7,7	17,0	610	2451	26,6	3.273	6,97
AP 29	0:47	6,06	667	558	450		586	24,9	32,4			18,5	837	1619	24,3	3.563	3,09
AP 30	0:21	6,96	678	558	460		591	23,8	29,6	230	12,6	18,7	701	1403	12,9	4.050	1,43
AP 31	1:18	8,02	622	526	460	434	585	32,8	46,3	250	12,2	22,6	1166	2200	16,9	4.647	8,98
AP 32	0:13	8,83	640	518	432	371	628	24,9	34,0	242	10,8	19,5	1055	2020	22,5	4.023	1,80
AP 33	0:32	10,38	614	506	470	442	614	31,1	43,6	312	12,3	21,5	1405	2626	24,7	4.519	4,08
AP 34	1:10	9,05	619	507	467	450	563	31,8	44,6	463	11,2	19,2	1398	2652	31,7	3.885	7,81
AP 35	0:59	10,00	635	520		435	746	37,0	49,1	337	13,0	25,0	1387	2636	21,5	4.127	6,92
AP 36	0:14	10,13	638	497	516	475	789	24,48	41,0	334	13,0	20,3	1403	2774	24,5	4.019	1,52
AP 37	2:02	8,79	629	520	500	467	799	26,2	45,2	482	14,6	20,4	1408	2799	32,7	2.574	10,56
AP 38	1:39	10,28	639	515	477	456		29,1	49,6		11,2	20,4	1464	2865	27,0	4.026	11,84
AP 42	0:55	6,06	639	504	467	307	887	22,6	27,5	385	11,3	17,6	-	2810	11,2	2.387	3,21
AP 44	0:38	9,56	665	515	434	442	595	21,0	28,9	428	7,0	12,8	1436	2985	25,9	2.985	3,94
AP 45	0:39	8,43	659	505	472	403	592	21,7	33,4	542	6,4	12,7	1423	2938	25,6	4.001	2,03
AP 48	1:04	8,85	616	507		446							1514	3162	20,2	4.060	6,87
Mittel	**0:54**	**8,65**	**640**	**518**	**462**	**427**	**648**	**26**	**38**	**329**	**10,4**	**18,6**	**1078**	**2381**	**23,2**	**3.666**	**5,14**

Tabelle 10: Überblick und Mittelwerte der Messungen der Laborpyrolyse

6.5.2 Probenahme und Analysen

Das Ziel der Projekte der PYTEC ist die energetische Verwertung von Pyrolyseöl, genauer die Verbrennung in einem Motor zur Erzeugung von Strom und Wärme. Aus diesem Grund wurden die Proben der Pyrolyseprodukte auch in erster Linie auf die Eigenschaften untersucht, die für eine Verbrennung relevant sind. Vorrangige Beachtung finden hier Wassergehalt und Brennwert, die Dichte, der pH-Wert und der Feststoffgehalt. Auch die Elementaranalyse der Öle gibt Aufschluss auf die Brennstoffeigenschaften. In Tabelle 11 sind die Analysen einiger Proben beispielhaft angeführt.

Zu Anfang wurden die zu untersuchenden Proben direkt aus dem Auffangbehälter gezogen. Da dieser nicht nach jedem Versuch vollkommen entleert und gereinigt werden konnte, vermischten sich hier die Öle unterschiedlicher Versuche (siehe Tabelle 11, AP 19/20/21). Um von jedem Anlagenbetrieb über einzelne Proben verfügen zu können, wurde ein sogenannter Side-Slip angebracht, der aus einer parallel geschalteten kleinen Kondensationsapparatur besteht. Es wird dabei ein kleiner Anteil des Primärgases vor Eintritt in den Quenchturm abgezogen und über einen Intensivkühler mit Kühlschlange kondensiert. Das entstehende Öl kann in einen Kolben abtropfen, während der nichtkondensierbare Gasanteil durch eine kleine E-Filter-Apparatur und einen Gaswäscher abströmt.

Regelmäßig wurden Proben aus dem Side-Slip (ss) und aus dem Auffangbehälter (q) analysiert, wobei zu beachten ist, dass die Proben aus dem Auffangbehälter aus mehreren Versuchen stammen.

Es ist zu beobachten, dass die Öle einen relativ hohen Wassergehalt aufweisen, was sich, ebenfalls wie die etwas geringe Ölausbeute, auf wiederkehrende Prozessunterbrechungen im Anlagenbetrieb zurückführen lässt. Gleichzeitig führt der hohe Wasseranteil ebenso zu einer relativ niedrigen Viskosität und einem niedrigen Heizwert. In einigen Proben führte der hohe Wassergehalt zu einer Phasentrennung. In solchen Fällen erhält man üblicherweise eine wässrige Phase mit extrem hohem und eine organische Phase, mit einem sehr niedrigen Wasseranteil.

Das Produktöl ist eine sehr heterogene Flüssigkeit, so dass bei längerer Lagerung im Auffangbehälter das Absetzen des Feststoffanteils und der schwereren Anteile des Öles eintritt. Es können hier mehrere Phasen unterschieden werden, die nicht durch eine eindeutige Grenze getrennt sind, wie es bei AP 19/20/21 zu sehen war. Typischerweise unterscheiden sich die Phasen in Wassergehalt, Viskosität und Brennwert. Durch Vermischen lassen sich die Phasen wieder homogenisieren.

Proben- bezeichnung	Wassergehalt in %	pH Wert	Viskosität in cSt			Dichte in g/cm³	Feststoff-gehalt in %	Elementaranalyse				Heizwert in MJ/Kg	GC-Messung
			20°C	50°C	80°C	20°C		C in %	H in %	N in %	O in %		
AP 19/20/21 reines Öl	36,0	-	18,5	5,0	-	-	0,01	33,3	8,2	0,2	58,3	12,5	+
AP 19/20/21 Mittelfraktion	34,6	-	21,5	5,8	-	-	0,07	35,4	8,1	0,2	56,3	13,4	+
AP 19/20/21 Bodenfraktion	33,9	-	-	-	-	-	0,63	39,7	8,0	0,2	52,1	15,6	+
AP 19/20/21 Bodensatz	13,3	-	-	-	-	-	4,43	57,4	7,2	0,2	35,2	23,4	+
AP42 q wässrige Phase	59,4	3,42	3,4	1,5	-	1,088	0,06	-	-	-	-	-	+
AP42 q organische Phase	16,6							-	-	-	-	-	+
AP42 ss wässrige Phase	60,6	3,35	3,1	1,4	-	1,080	0,23	-	-	-	-	-	+
AP42 ss org. Phase	14,5							-	-	-	-	-	+
AP44q	41,8	2,74	-	-	-	-	0,28	34,3	8,6	0,3	56,8	13,7	+
AP44ss	32,5	2,54	-	-	-	-	0,41	42,1	7,9	0,7	49,3	16,8	+
AP45q unten	36,5	2,67	12,9	4,3	-	-	0,14	33,2	8,4	0,4	58,0	12,8	+
AP45q oben	39,6	2,61	11,7	3,8	-	-	0,02	31,5	8,5	0,7	59,3	12,3	+
AP45ss	34,6	2,17	-	-	-	-	0,39	37,5	8,1	0,5	53,9	14,7	+
AP47q	35,6	2,42	-	-	-	-	0,48	37,1	8,1	0,3	54,5	14,4	-
AP47ss	34,0	2,18	-	-	-	-	0,33	39,7	8,0	0,3	52,0	15,6	-
AP49ss	36,2	1,90	11,3	4,0	-	-	0,10	34,9	8,3	0,3	56,5	13,5	-
AP50 q	23,4	2,51	-	-	-	-	-	43,0	7,5	0,6	48,9	16,6	-
AP50 ss	39,9	2,08	-	-	-	-	-	34,2	8,1	0,6	57,1	13,0	-

Tabelle 11: Beispiele einiger Produktanalysen

AP ablative Pyrolyse

q Quenche (Probenahme aus Auffangbehälter)

ss Sideslip

7 Auslegung und Konstruktion der Pilotanlage

7.1 Überblick und Randbedingungen

Die Pilotanlage der PYTEC verarbeitet 6 to/d atro Biomasse. Die Anlage besteht aus 8 Betriebseinheiten (Holzlager, Trockner, Pyrolysator, Kondensator, BHKW, Materiallager, Schaltraum, Büroraum). Die Anlageneinheiten sind in einzelnen Standardcontainern untergebracht, so dass zur Anlagenerrichtung kein nennenswerter baulicher Aufwand betrieben werden muss. In Abbildung 24 sind die einzelnen Verfahrensschritte dargestellt, die die Biomassel von der Lagerung bis zur Stromerzeugung im BHKW durchläuft.

Die Realisierung der Pilotanlage wurde von einer Reihe von Randbedingungen beeinflusst. Die Standortwahl fiel auf ein Sägewerk im Landkreis Cuxhaven, das sowohl als Rohstofflieferant, als auch als Wärmeabnehmer fungiert. Als Rohstoff werden Holzhackschnitzel aus einem Profilzerspaner genutzt.

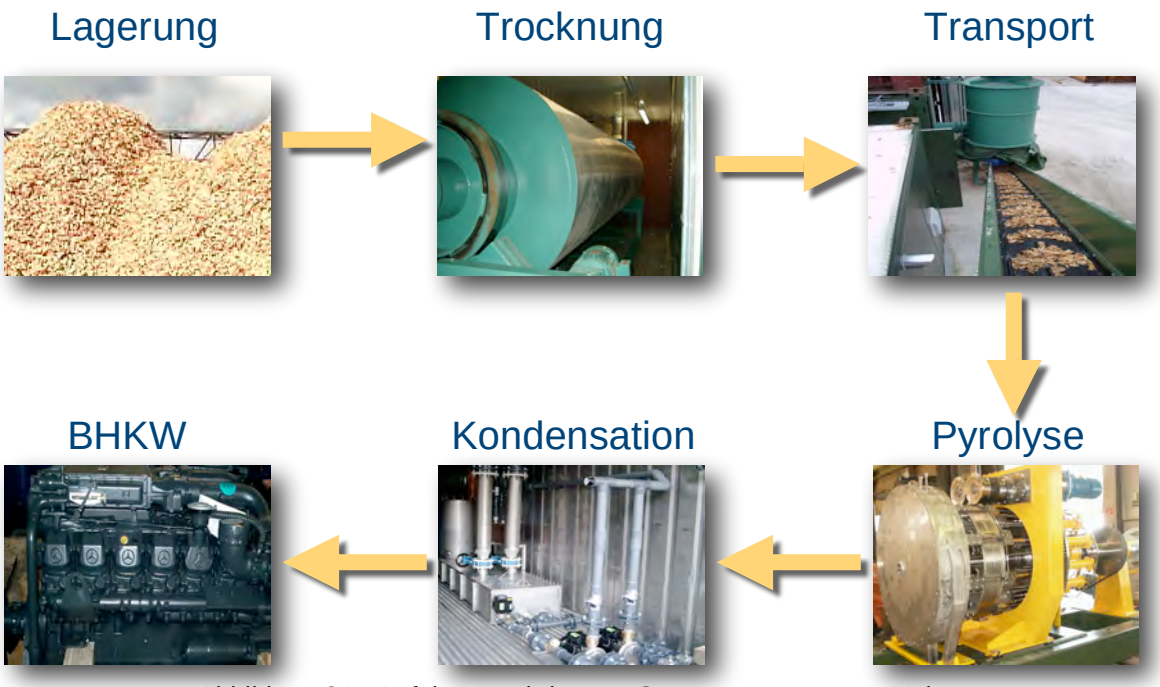


Abbildung 24: Verfahrensschritte zur Stromerzeugung aus Holz

Die konstruktive Ausführung ist so angelegt, dass möglichst kurze Wege überwunden werden und die Anlage möglichst wenig Fläche benötigt. Dies ist hinsichtlich des Grundkonzeptes der Anlagen (kleine Anlagen dezentral an geeigneten Standorten anstatt wenige zentrale Großanlagen) ein entscheidender Faktor, um die Genehmigungsfähigkeit der Anlage in ländlichen räumen zu erleichtern. In Abbildung 25 ist die Anlage in einer 3-D-Ansicht dargestellt.

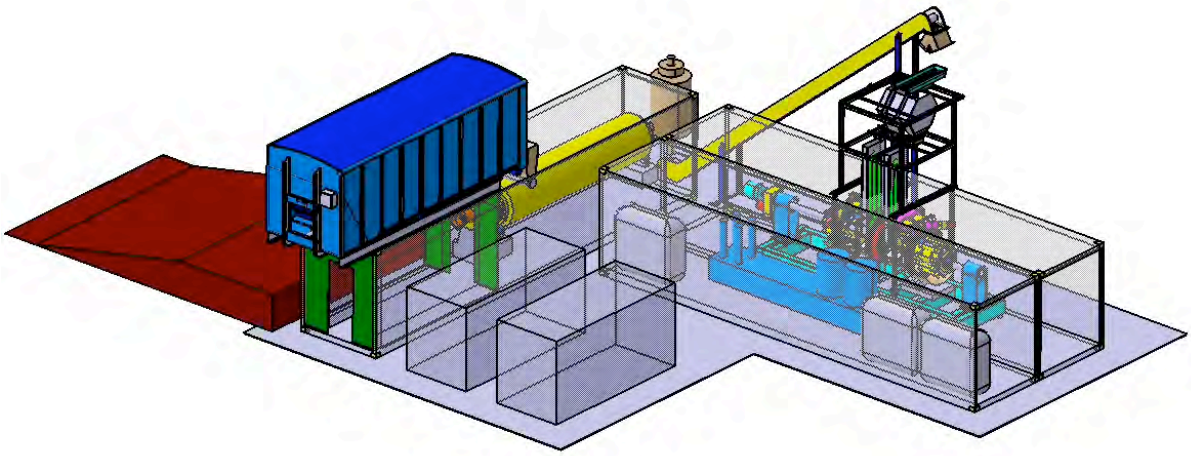


Abbildung 25: 3-D-Ansicht der Pilotanlage zur ablativen Flash-Pyrolyse

7.2 Lagerung und Trocknung

Die Einheiten der Trocknung und Lagerung der Hackschnitzel können durch Standardlösungen realisiert werden. Es ist darauf zu achten, dass die Lagerbehälter nach Ihrer Größe so angelegt sind, dass die Lieferungen nicht zu oft erfolgen müssen, das Holz aber auch nicht zu lange gelagert wird, um Faulungsprozesse zu vermeiden.

Die Ansprüche an die Trocknung der Biomasse sind hoch, da das Holz möglichst trocken in den Pyrolyseprozess aufgegeben werden soll, Verkohlungsprozesse jedoch unbedingt zu vermeiden sind. Die Trocknung in der Pilotanlage erfolgt in einem 3-Zug-Trommeltrockner. Durch die Ausführung als Dreizugtrommel ist die Trocknung von Produkten mit unterschiedlicher Anfangsfeuchte möglich. Die Regelung der Endfeuchte mit der damit verbundenen Produktqualität wird gewährleistet.

7.3 Zuführung der Biomasse

7.3.1 Anforderungen an die Holzzuführung

In Anlagen der ablativen Flashpyrolyse sollen grobe Holzhackschnitzel verwendet werden, die in geeigneter Form in den Reaktor geschleust werden müssen. Dabei sind folgende Punkte insbesondere zu beachten:

- Kontinuierliche Zuführung

Die Zuführung von Biomasse muss so gleichmäßig wie möglich erfolgen, um zu große Schwankungen in der Gasproduktion und somit in den Druckverhältnissen zu vermeiden. Diese Schwankungen, wie sie an der Laboranlage oft zu beobachten waren, können Produktqualität- und –quantität durch Ziehen von Leckluft negativ beeinflussen.

- Mindestdurchsatz

Die Einhaltung des angesetzten Mindestumsatzes ist eine wichtige Komponente, um die erforderlichen Aufenthaltszeiten nicht zu überschreiten

- Ausschluss von Sauerstoff

Die Holzhackschnitzel müssen soweit verpresst werden, dass möglichst kein Sauerstoff aus der Umgebung in den Reaktor gelangt und dort zu Verbrennungen führen kann.

Hinsichtlich dieser Anforderungen musste ein Konzept erarbeitet werden, in dem die Hackschnitzel verpresst und kontinuierlich gefördert werden können. Die Schwierigkeiten traten hier hauptsächlich dadurch auf, dass Holz durch seinen hohen Reibungskoeffizient zu Verklemmungen neigt, insbesondere wenn es verpresst gefördert werden soll.

7.3.2 Konzepte

Es konnte auf dem bestehenden Markt keine geeignete Vorrichtung gefunden werden, die den o. g. Ansprüchen der Reaktorzuführung genügt hätte. Aus diesem Grund musste ein eigenes Konzept neu entwickelt und konstruiert werden.

7.3.2.1 Zuführung über Förderschnecken

Zu Anfang wurde die Idee verfolgt, die Zuführung durch Förderschnecken zu realisieren. Nach einer zeitintensiven Recherche nach Erfahrungswerten und an einer Zusammenarbeit interessierten Herstellern, wurde jedoch wieder von dem Konzept der Förderschnecke abgesehen, da keine aussichtsreichen Referenzen gefunden werden konnten. Die von Herstellern überwiegend getätigte Aussage lässt sich folgendermaßen zusammenfassen: Erfahrungswerte im Umgang mit Holz liegen, wenn überhaupt, nur in geringem Umfang vor. Aufgrund stellenweise durchgeführter Versuche mit Holzhackschnitzeln und den hierbei gesammelten Ergebnissen sind viele Unternehmen dazu übergegangen, weiterführende Versuche oder gar die Produktion von Schnecken für Holzhackschnitzel einzustellen.

Ein entscheidender Faktor bei den Schwierigkeiten mit Holzhackschnitzeln sind die Unregelmäßigkeiten des Produkts. Ändert sich die mittlere Korngröße oder die feuchte der Schnitzel nur leicht, so kann sich das Verhalten oft sehr stark verändern. Eine Pressung von Holzhackschnitzel, wie sie für die Zuführung des Pyrolysereaktors notwendig wäre, wurde von erfahrenen Herstellern von Förderschnecken als nicht realisierbar betrachtet.

7.3.2.2 Zuführung über einen Walzenstuhl

Da die Verpressung der Hackschnitzel bei der Zuführung außerordentlich wichtig für den Pyrolyseprozess ist, musste ein Konzept erdacht werden, dass diese Aufgabe zuverlässig bewältigen kann. Aus dieser Prämisse kam ein Entwurf, in der die Hackschnitzel in einem Walzenstuhl verpresst werden, zustande. Die Hackschnitzel werden in dieser Vorrichtung zwischen zwei geschienten Förderbändern in einem Schacht herabtransportiert bis sie durch einen Walzenstuhl verpresst und in Kammern eingeschoben werden. Diese Kammern gehören zu einem Revolversystem mit 10 Kanälen, über die die Biomasse in den Reaktor eingeschoben wird. Das Revolversystem, das dem Prinzip der Laboranlage ähnlich ist, widerspricht zwar der Forderung nach einer vollständig kontinuierlichen Förderung. Da der Revolver jedoch über 10 Kanäle verfügt, macht sich der Rückgang in der Gasproduktion nur gering bemerkbar, wenn einer der Kanäle neu befüllt wird.

Auch dieses Konzept ist nicht problemlos realisierbar, da die Hackschnitzel zwischen den Walzen (ebenso wie in einer Förderschnecke) und in den Förderkanälen hinter den Walzen zum Verklemmen neigen. Durch geeignete Maßnahmen konnte diese Schwierigkeit jedoch aus dem Weg geräumt werden (siehe Abschnitte 7.3.3 und 7.3.4). Um die Funktion des erdachten Konzeptes zu überprüfen, wurde zunächst ein Versuchsstand errichtet, an dem die notwendigen Verbesserungen und die Betriebsparameter (aufzubringende Kräfte/ erreichbare Geschwindigkeiten) ermittelt wurden.

7.3.3 Aufbau des Versuchsstands

Der Versuchsstand zur Erprobung der Holzzuführung besteht im Wesentlichen aus einem 2,30 m langen vertikalen Einfüllsegment, einem Abschersegment und einem Ausschubsegment, wobei letztere das in der Pilotanlage geplante Revolversystem imitieren. Angetrieben werden diese Elemente durch hydraulisch betätigte Zylinder, was zu einem diskontinuierlichen Betrieb der Einschubwalzen führt. Das Modell ist in Abbildung 26 dargestellt.

Das Einfüllsegment besteht aus einem System von Riementrieb und Walzenstuhl. Die Zuführeinheit der Holzhackschnitzel wird von oben befüllt. Die Biomasse wird durch einen Schacht von 2,30 m Länge zwischen den Kunststoffriemen bis zu den hydraulisch betätigten Antriebsrollen transportiert. Diese Antriebsrollen fungieren zugleich als Walzenstuhl, wo die Hackschnitzel verdichtet und in den rechteckigen Abscherkanal (20x100 mm) gepresst werden. Der Kanal wird über einen weiteren Hydraulikzylinder nach vorne gekippt, um die die Abscherbewegung des Revolvers nachzuahmen. Der dritte Hydraulikzylinder dient letztendlich zum Ausschub des verdichteten Schnitzelkuchens. Dieser erfolgt durch einen rechteckigen Kanal, dessen Länge durch Einbau von Metallsegmenten zwischen 120-320 mm variiert werden kann. Am Kanalende befin-

det sich eine gefedert befestigte Metallplatte, um am Ausgang vorhandenen Druckkräfte aufzunehmen und zu messen zu können.

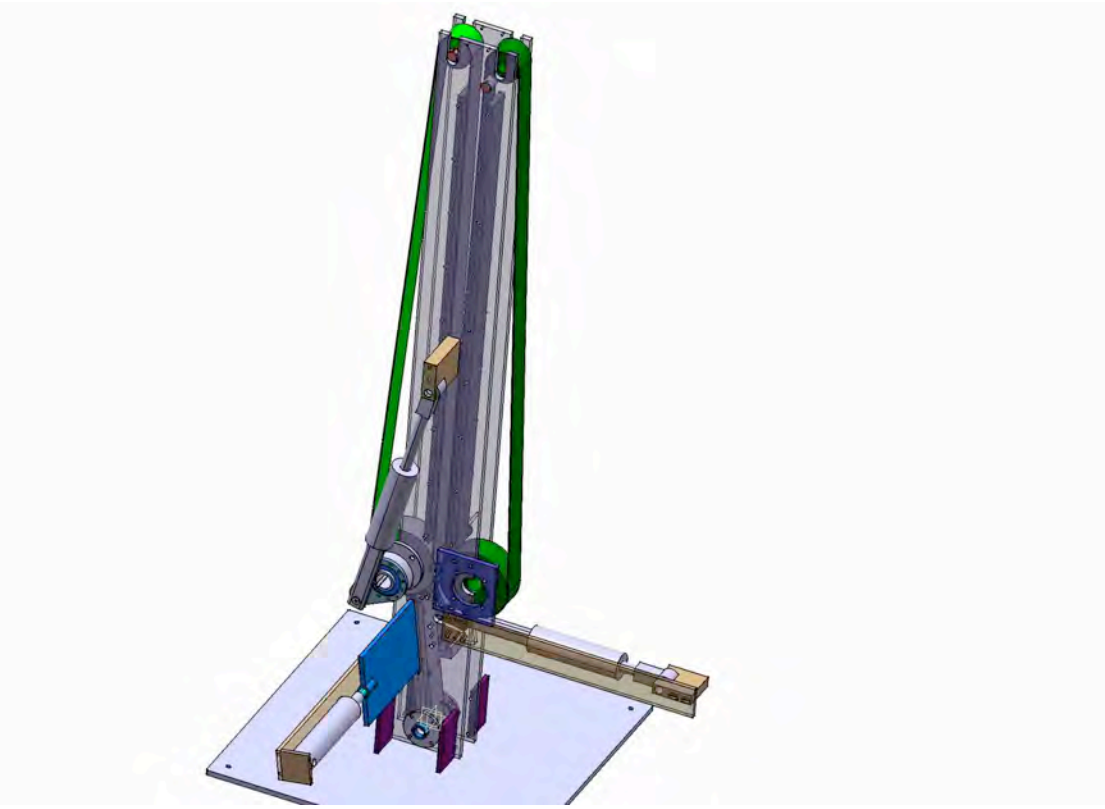


Abbildung 26: 3-D-Ansicht Einschubmodell

Durch Einstellung der Stahlfedern konnten die auftretenden Druckkräfte beim Ausschub variiert werden. Die Messungen wurden mit Hilfe eines piezoelektronischen Druckaufnehmers erstellt, über einen Analog-Digitalwandler direkt in einen PC gespeist, und über eine Spezialsoftware (Data Acquisition System) ausgewertet und gespeichert.

Anhand der realisierten Versuche konnten die notwendigen Rückschlüsse bezüglich den auftretenden Reibungskräften, sowie der erreichbaren Pressdichte der Hackschnitzel gezogen werden (Ansicht eines Presskuchens in Abbildung 27). Basierend auf diesen Daten konnte die Zuführung des Revolversystems der Pilotanlage, sowie die benötigten Antriebsleistungen festgelegt werden.

Auch bei diesem Konzept der Zuführung kam es zunächst zu Problemen durch Verklemmungen. Diese konnten gelöst werden, indem die Teile, in denen das Holz im Verpressten Zustand transportiert wird, mit Gleitbeschichtungen versehen wurden.

Abbildung 27: Presskuchen am Einschubmodell

7.3.4 Zuführung der Pilotanlage

Die Zuführung der Pilotanlage wurde dem Modell identisch nachgebaut, jedoch werden die Walzen hier nicht hydraulisch, sondern elektrisch angetrieben, wodurch sie im Gegensatz zu denen des Versuchsstandes kontinuierlich laufen. Nach einiger Zeit häuften sich Verklemmungen der Hackschnitzel, was sich darauf zurückführen ließ, dass die Gleitbeschichtung abgetragen war. Um unnötigen Kosten- und Wartungsaufwand durch Erneuern der Gleitbeschichtungen zu umgehen, wurde dazu übergegangen, ein Schmiermittel zuzugeben, dass die Förderung der Hackschnitzel erheblich vereinfacht und sich nicht störend im Produktöl bemerkbar macht.

7.4 Pyrolysator

Die konstruktive Einheit des Pyrolysators kann in 3 Parts unterteilt werden, das Revolversystem, die Heizscheibe und das Reaktorgehäuse. Zusätzlich gehört zu diesem Bauteil ein Hydraulikaggregat, über welches die die Stempel des Revolversystems betrieben werden.

Die Heizplatte dreht sich mit etwa mit 75 min^{-1} und schleppt dabei über die angepresste Biomasse taktweise den Revolver mit, wenn der Befüllvorgang einer Kammer beendet ist. Das Gasgehäuse ist bei der Pilotanlage vollkommen rund und umschließt ohne Toträume die Heizscheibe. Der Austrag der Grobkohle erfolgt kontinuierlich über eine Förderschnecke, die Feinkohle wird wie bei der Pilotanlage über einen Zyklon abgeschieden.

Die Dichtungen der drehenden Teile gegeneinander werden auf der Welle durch Feyringe und am äußeren Rand des Gasgehäuses durch Stopfbuchsen realisiert. Die Mundstücke der Kanalöffnungen sind aus wärmeisolierenden Keramiken gefertigt. Nach den ersten Betriebserfahrungen hat sich jedoch gezeigt, dass die Teile auf der dem Druck zugewandten Seite der mechanischen Belastung nicht Stand halten und durch resistentere Stahlmundstücke ersetzt werden müssen.

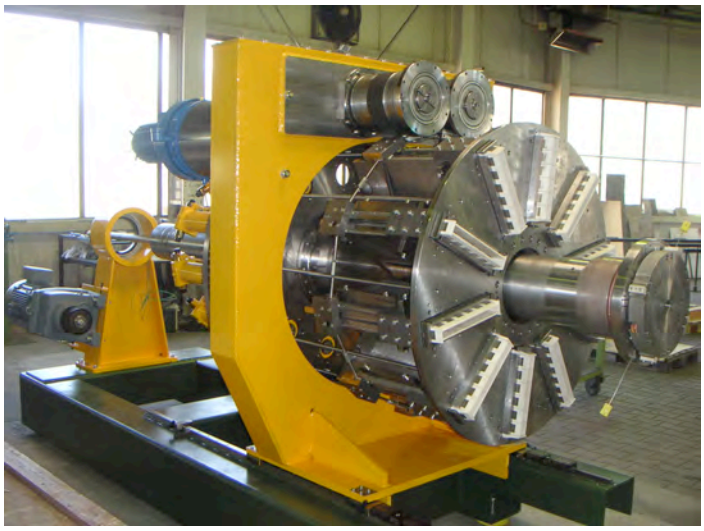


Abbildung 28: Pyrolysator bei Fertigstellung der Montage

7.5 Kondensator

Das Konzept des Kondensators der Laboranlage konnte direkt übernommen werden, ohne Änderungen in der Verfahrenstechnik vorzunehmen. Das Upscaling gelang ohne weitere Probleme. Auch bei der Pilotanlage hat sich gezeigt, dass sich Koksablagerungen am Eingang des Quenchturmes absetzen, wenn die vorgesehene Reinigungseinrichtung nicht in Betrieb genommen wird. Da die Durchmesser des Überströmrohres inklusive des Ein- und Ausganges wesentlich größer sind, kam es nie zu Störungen durch Verstopfungen.

8 Energetische Verwertung des Pyrolyseöls

Zur Erreichung des Projektzieles, musste ein Weg gefunden werden, Pyrolyseöl auf ökonomische Weise energetisch nutzbar zu machen. Als flüssiger Kraftstoff eignet sich Pyrolyseöl dazu, in Motoren verbrannt zu werden. Aufgrund seiner Eigenschaften ist dabei an große unempfindliche Dieselmotoren zu denken, an denen aufgrund des hohen Säuregehalts werkstoffliche Modifikationen vorgenommen werden müssen. Die ersten Versuche im Auftrag der PYTEC wurden von den Motorenwerken Bremerhaven in Verbund mit der Hochschule Bremerhaven durchgeführt. Nach zwei nicht zufrieden stellenden Testfahrten stiegen die MBW aus dem Projekt aus. Als Folgepartner wurde S.E.A.D. gefunden, die sich fortan an der Entwicklung der energetischen Nutzung beteiligten.

Die Daten und Abläufe der realisierten Motorentests werden im Folgenden dargestellt. Die Daten und Beschreibungen der Testläufe in Bremerhaven wurden dem darüber verfassten Bericht [23] entnommen. Die unter 8.1 und 8.2 beschriebenen Motorentests wurden mit Pyrolyseöl aus der Produktion der Fa. Fortum in Finnland durchgeführt, da aus eigener Produktion (Betrieb des Laborreaktors) keine ausreichenden Mengen bereitgestellt werden konnten.

8.1 Versuchsphase bei MWB

8.1.1 Versuchsdaten

Das für die Untersuchungen verwendete Dieselaggregat besteht aus einem Viertakt-Dieselmotor des Typs Deutz MWM TD 226-6, sowie einem Generator des Typs Siemens 1FC6 226-4LA 45-Z mit einer Leistung von 80 kVA.

Tabelle 12: Daten des Testmotors von MWB

Nennleistung	85 kW
Blockierte Leistung	93 kW
Drehzahl	1500 min^{-1}
Hub	105 mm
Verdichtungsverhältnis	120 mm

Das Kurbelgehäuse des Motors und das Gehäuse des Generators sind über eine Kupplungsglocke starr verschraubt. Die Kurbelwelle des Motors und die Generatorwelle sind mittels einer drehelastischen Kupplung verbunden. Dieselmotor und Generator sind starr auf dem Aggregatrahmen befestigt, der elastisch auf dem Hallenboden gelagert ist. Die Nennfrequenz des Aggregates be-

trägt 50 Hz bei einer Drehzahl von 1500 min^{-1}. Die Belastung des Generators erfolgt durch Parallelbetrieb mit dem Stadtnetz.

Die Leistung des Aggregates wird über die elektrische Leistung des Generators bestimmt. Dabei wird ein Generatorwirkungsgrad von 96 % zugrunde gelegt. Zur Ermittlung des Luftdurchsatzes wird ein Flügelradanemometer in einem Ansaugkanal mit bekanntem Querschnitt vor dem Verdichter verwendet. Der Brennstoffverbrauch wird mit einem Seppeler-Kolbenprober mit einem Volumen von 500/1000 ml gemessen. Die Abgasschadstoffemissionen NOx, CO und CO_2 sowie der O_2-Gehalt im Abgas werden direkt nach Turbolader gemessen.

Da das Pyrolyseöl eine stark polare Flüssigkeit ist, wurde bei diesem Versuch davon abgesehen, das Pyrolyseöl mit Dieselkraftstoff zu mischen. Als Stützkraftstoff, sowie als Mittel zur Herabsetzung der Viskosität wurde Methanol genutzt. Zum Erreichen einer Einspritzviskosität von 10 cSt / 20°C erwies sich der Zusatz von 30 % Methanol als notwendig. .

8.1.2 Versuchsdurchführungen

8.1.2.1 Versuch 1

Die Lagerung des Brennstoffs erfolgte in säurebeständigen Kunststofffässern. Alle Brennstoff führenden Leitungen und Aggregate außerhalb des Motors, wie Filter und Pumpen wurden in korrosionsbeständigem Edelstahl ausgeführt. Einspritzpumpenelemente und Einspritzdüsennadeln wurden zum Schutz gegen das aggressive Pyrolyseöl mit Siliziumkarbid beschichtet. Diese Beschichtung ergab ein Wachsen des Materialvolumens, weshalb diese Bauteile anschließend wieder auf Maß geschliffen werden mussten.

Der Motor wurde zunächst mit Dieselöl angefahren, und dann bei 50 % der Nennleistung auf Pyrolyseöl umgeschaltet. Daraufhin wurde der Motor 30 min. ohne Zwischenfälle bei Volllast betrieben. Es wurden mit dem Pyrolyseöl eine Leistung von 60 kW, also 75 % der mit Dieselöl erreichbaren Leistung, erreicht. Daran schloss sich nach dem Umschalten auf Dieselkraftstoff ein einstündiger Spüllauf bei Volllast an.

8.1.2.2 Versuch 2

Beim nächsten Startversuch, der zwei Tage später erfolgte, stellte sich heraus, dass die Regelstange der Einspritzpumpe durch ein hängendes Einspritzpumpenelement (Zyl. 1) blockiert war. Nach dem Ausbau und der Zerlegung des Elementes war am Plunger ein lackartiger Überzug zu erkennen, der das Blockieren des Elementes verursacht hatte. Weiterhin wurde festgestellt, dass die Kuppen der Einspritzdüsen lackartig überzogen und die Dichtsitze und Spitzen der Düsennadeln stark verkokt waren. Nach Reinigung und Reparatur der Einspritzpumpe wurde bei der Einstellung des Förderbeginns festgestellt, dass das

Einlaßventil von Zyl. 6 der Motordrehung nicht umgehend folgt. Auch hier dürfte ein Verkleben des Ventilschaftes in der Führung vorliegen.

Wegen des oben beschriebenen Blockierens der Regelstange wurde der Motor vor weiteren Versuchen mit Pyrolyseöl mit einer Sicherheitseinrichtung versehen, die ein Ausblasen des Kraftstoffs aus der Einspritzpumpe ermöglicht und damit bei Notstop ein sicheres Abstellen des Motors unabhängig von der Regelstangenstellung sicherstellt.

Beim nächsten Versuchslauf erfolgte das Umschalten von Dieselöl auf Pyrolyseöl bei ca. 50 % Leistung. Nach ca. 50 Minuten Laufzeit bei Volllast mit Pyrolyseöl musste der Motor gestoppt werden, da an der Öffnung des Ölpeilstabs große Mengen an Schmieröl aus der Ölwanne geblasen wurden. Dies deutete auf eine wesentlich erhöhte Blow-by-Gasmenge infolge festsitzender Kolberinge hin. Am nächsten Tag ließ sich der Motor nicht mehr von Hand durchdrehen.

Die nachfolgende Zerlegung und Besichtigung ergab folgende Beschädigungen:

- Brennräume mit schwarzer Lackartiger Schicht überzogen, bei Zylinder 1 flüssiger Teer in der Kolbenmulde
- Laufbuchsen im oberen Bereich mit schwarzer, gummiartiger Beschichtung
- Kolben am Feuersteg und im Ringband mit starker Verschmutzung, Kolbenringe festgeklebt und nicht mehr beweglich auch Kolbenhemd teilweise verschmiert
- Starke Ablagerungen auf der Feuerplatte der Zylinderköpfe
- Auslasskanäle einiger Zylinderköpfe mit schwarzer klebriger Schicht überzogen (wahrscheinlich Folge von offenen Auslassventilen)
- Lackartige Ablagerungen im Kipphebelraum der Zylinderköpfe
- Spitzen der Einspritzdüsen mit schwarzem Lack überzogen
- Ventile teilweise in Führungen verklebt, starke Ablagerungen an Teller und Schaft
- Kolben, Kolbenbolzen und Pleuelstange im Kolbenbolzenlager zusammengeklebt, nur durch Hammerschläge zu lösen
- Nockenwelle mit schwarzem Lack überzogen
- Schmierölbohrungen der Kurbelwelle durch schwarze, gummiartige Masse verstopft
- Haupt- und Pleuellagerschalen mit Lackschicht überzogen
- Ölpumpe blockiert, Ansaugsieb der Ölpumpe mit gummiartiger Masse verstopft

- Ölwanne mit gummiartiger Schicht überzogen, die sich nach einige Tagen teilweise abziehen lässt
- Turbinenseitiges Lager des Abgasturboladers gefressen, Welle blockiert

Außer den Kolbenringen, die meistens beim Lösen aus den Nuten zerbrachen, den Lagerschalen, bei denen beim Entfernen der Lackschicht die weiche Laufschicht beschädigt wurde und der Ölpumpe konnten alle Hauptteile des Motors nach dem Reinigen wieder verwendet werden. Die Einspritzdüsen mussten ebenfalls erneuert werden, da sich die Nadeln nicht mehr lösen ließen. Das Schmieröl, das sich nach dem Abstellen noch im Motor befand, war zunächst flüssig, verhärtete sich aber im Verlauf einiger Tage zu einer gummiartigen Masse.

8.1.3 Fazit

Ein Spüllauf mit reinem Gasöl nach der Verwendung von Pyrolyseöl reichte nicht aus, um ein Verkleben von Bauteilen zu verhindern. Es sind jedoch auch Störungen und Beschädigungen aufgetreten, die auf eine Störung von Komponentenfunktionen während des Laufes mit Pyrolyseöl hindeuten, wie etwa die Bildung harter, lackartiger Schichten in engen Spalten, z.B. in Einspritzpumpenelementen, Einspritzdüsen und Lagerspalten die zum Verkleben und zur Fehlfunktion der Komponenten führen.

8.2 Versuchsphase bei S.E.A.D.

Nachdem die Motorenwerke Bremerhaven die Testreihen an dem MWM-Aggregat bereits nach den beschriebenen Versuchen abgebrochen hatten, musste sich seitens der PYTEC nach neuen Partnern umgesehen werden. Aufgrund von Ergebnissen anderer Forschungsgruppen wurde dazu übergegangen, mit Dieselmotoren zu arbeiteten, die bereits erfolgreich mit anderen sauren Sonderbrennstoffen, wie z. B. alten Frittierfetten, betrieben worden sind. Die nächsten Versuche mit Pyrolyseöl erfolgen in einem wesentlich größeren Dieselmotore, der von der Fa. S.E.A.D. in Plochingen für Versuchszwecke zu Verfügung gestellt wurde.

8.2.1 Versuchsdaten

Der getestete Dieselmotor ist ein 12-Zylinder-Motor von Mercedes Benz des Typs OM 444 LA mit einer Feuerungswärmeleistung von 690 kW.

Tabelle 13: Daten des Testmotors von S.E.A.D.

Nennleistung	500 kW
Blockierte Leistung	550 kW
Drehzahl	1500 min^{-1}
Hubraum	22 l

Der Motor ist Bestandteil eines containerisierten BHKWs, das bei der Fa. S.E.A.D. in Plochingen aufgestellt und angeschlossen ist. Als Stützkraftstoff in der Verbrennung wurde Dieselkraftstoff genutzt. Die beiden Kraftstoffe wurden in einer Mischvorrichtung vor der Einspritzpumpe zusammengeführt und gut miteinander vermengt, indem das Stoffgemisch unter hohem Druck feine Düsen passieren musste. Das Gehäuse der Einspritzpumpe ist aus einer gewöhnlichen Aluminiumlegierung gefertigt, die Pumpenelemente aus Edelstahl.

8.2.2 Versuchsablauf

Der Motor wurde für den Testlauf mit Pyrolyseöl zunächst mit reinem Diesel angefahren. Bei Erreichen der stationären Betriebsparameter wurde der Motor zunächst mit einer Mischung von Pyrolyseöl und Diesel im Verhältnis von 30:70 beschickt. Dieses Mischungsverhältnis wurde stetig durch die Vergrößerung des Pyrolyseölanteils verändert bis hin zu einem Mischungsverhältnis von 97:3. Bis zum Erreichen dieses Zustandes vergingen 2 Betriebsstunden. Mit diesem Mischungsverhältnis wurde der Motor darauf folgend 10 Stunden kontinuierlich betrieben. Es stellte sich dabei bei einer Abgastemperatur von 450 °C eine Generatorleistung von 306 kW ein.

Nach 10 Stunden kam es zu einem Ausfall des Motors da die Federn der Einspritzdüsennadeln an mehreren Zylindern gebrochen waren. Dies ist gemäß Aussagen des Motorbetreibers ein übliches Problem, dass nicht auf die besonderen Eigenschaften des Pyrolyseöls zurückzuführen sei. Der Motor wurde in der Notfallroutine abgefahren und dabei kurz mit reinem Dieselöl gespült.

Nach der Testfahrt wurde die Einspritzdüse zum Säubern auseinander genommen. Nach Austauschen der gebrochenen Federn, konnte der Motor wieder problemfrei angefahren werden.

In Tabelle 14 sind die Basisdaten der Versuche bei MWB und S.E.A.D zum Vergleich gegenübergestellt:

Tabelle 14: Vergleichende Darstellung der Testläufe

	S.E.A.D.	MWB
Kraftstoffgemisch	PY-Öl/Diesel (97/3)	PY-Öl/Methanol (70/30)
Abgegebene Leistung	306 kW	60 kW
Abgastemperatur	450°C	450°C
Abgaszusammensetzung		
CO	120% zu CO_{nenn}	390 mg/m³
NOx	100% zu NOx_{nenn}	1400 mg/m³
Betriebsdauer	10 h	50 min

8.2.3 Fazit

Der Literatur über den Betrieb von Pyrolyseölmotoren ist zu entnehmen, dass ein wichtiger Punkt zur Erreichung einer hohen Dauerlauffestigkeit die Korrosionsbeständigkeit der Einspritzsysteme gegenüber dem sehr sauren Pyrolyseöl ist. Die von PYTEC ausgewählte Firma hat Materialpaarungen für Einspritzpumpen und Düsen gefunden, die geeignet scheinen, eine ausreichend hohe Betriebsstundenzahl sicher zu stellen. Der mit bis zu 40% sehr hohe Wasseranteil im Pyrolyseöl stellte in dem von S.E.A.D. betriebenen Motor kein Problem dar.

Das Aggregat von S.E.A.D. basiert auf einem Serienaggregat der Fa. Daimler-Chrysler / MTU und kann somit problemlos für Serienanlagen der ablativen Flashpyrolyse zur energetischen Nutzung von Biomasse eingeplant werden.

8.3 Aktivitäten zur Optimierung der energetischen Nutzung

Durch den 12-Stunden-Test bei der Fa. S.E.A.D. konnte bewiesen werden, dass die Verbrennung von Pyrolyseöl in dem genutzten stationären Dieselmotor möglich ist. In folgenden Arbeitsschritten wurde von der PYTEC ein BHKW mit gleichem Dieselaggregat für den Betrieb in der Pilotanlage in Bülkau beschafft.

Es ist anzunehmen, dass der erfolgreiche Einsatzes von Pyrolyseöl in dem von S.E.A.D. gestellten Motor auf folgende Faktoren zurückzuführen ist:

- Ausführung der Pumpenelemente in korrosionsbeständigem Material
- Feststoffabscheidung durch Druckfiltration
- Optimale Mischung von Kraftstoff und Stützbrennstoff (Py-Öl/Diesel) in Düsenmischvorrichtung

Die genannten Faktoren sind noch nicht abschließend untersucht. Die Verbrennung kann zwar erfolgreich dargestellt werden, manchmal zeigen sich jedoch auch hier Probleme, wie sie bei unter 5.4.3 beschriebenen Untersuchungen beobachtet wurden (Verklebungen durch polymerisierte Rückstände, Ausfälle von Pumpenelementen). Es stellt sich die Frage, wie sich die Beimischung von Stützkraftstoff auf die positiv oder störend auswirkt, bzw. welcher Stützkraftstoff in welcher Quantität das beste Verhalten zeigt. Aus diesem Grunde werden weitere Versuche an einen mit Hilfe eines Einspritzumpenprüfstands realisiert werden. Im Laufe dieser Tests soll genau untersucht werden, mit welchen Hilfsmitteln das optimale Verbrennungsverhalten des Pyrolyseöls eingestellt werden kann.

Der Motor der Pilotanlage (Mercedes Benz OM 444 LA, siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) wurde zusätzlich mit Temperaturmessfühlern auf den Zylindern versehen, um die Funktionsfähigkeit der einzelnen Kompartimente kontrollieren und Ausfälle sofort registrieren und analysieren zu können.

Abbildung 29 Dieselaggregat der Pilotanlage

Pumpenelemente. In von der PYTEC realisierten Testläufen zeigte sich, wie schon in Experimenten anderer Institutionen (siehe 5.4.3), dass die Elemente der Einspritzpumpen aus korrosionsbeständigem Material gefertigt werden müssen. Um die Funktionsfähigkeit des Prototyps garantieren zu können, wurde zunächst eine Pumpe, sowohl Gehäuse wie auch bewegliche Teile, aus Spezialstählen gefertigt und teilweise mit Beschichtungen versehen. Durch die-

se Maßnahmen kann die Beständigkeit der Materialien gewährleistet werden. Um den dadurch entstehenden Kostenaufwand zu mindern, wird die Entwicklungsarbeit nun darauf konzentriert, die richtigen Materialien und Verfahren für beständige Beschichtungen zu finden.

Feststoffabscheidung. Die Feststoffabscheidung spielt für den störungsfreien Betrieb eine entscheidende Rolle. Ebenso wie in dem Test-BHKW wird diese über einen Rückspülfilter mit einen Abscheidung bis zu einer Partikelgröße von 10 µm realisiert. Erst nach Passage durch diesen Druckfilter gelangt das Pyrolyseöl in die Mischvorrichtung, wo der Stützbrennstoff zugesetzt wird. Das Kraftstoffgemisch passiert dann anschließend den im Dieselbetrieb üblichen Kraftstofffilter.

Mischvorrichtung. Pyrolyseöl und Stützbrennstoff werden von einer Spezialpumpe angesaugt. Vor der Pumpe werden die Kraftstoffe zusammengeführt und in der turbulenten Strömung der Pumpe miteinander vermischt. Der Großteil des Kraftstoffgemisches strömt über die Bypassleitung im Kreislauf, nur ein geringer Anteil wird von Einspritzsystem zur Verbrennung abgezogen. Durch die Kreislaufführung über die schnell laufende Spezialpumpe kann eine optimale Mischung erreicht werden.

Obwohl im Testlauf bei S.E.A.D. mit Dieselöl als Stützbrennstoff gute Erfahrungen gemacht wurden, wurde mittlerweile dazu übergegangen, Alkohol beizumischen. Der Vorteil liegt hier in erster Linie in den besseren Eigenschaften bezüglich des Misch- und Reinigungsverhaltens. Bezüglich des optimalen Mischungsverhältnisses müssen noch längere Dauertests erfolgen, da hier eventuell auftretende Verschmutzungen (Lackschichten, Verklebungen) im Langzeittest beobachtet werden müssen. Auch bei den bisherigen Erfahrungen der PYTEC konnte regelmäßig die Bildung von lackartigen Anhaftungen in den Motorräumen beobachtet werden, diese führten jedoch nicht zu Störungen des Betriebes.

An- und Abfahrroutine. Als nachteilig muss betrachtet werden, dass der Betrieb noch auf An- und Abfahrroutinen angewiesen ist. Dies bedeutet, dass der Motor zu Beginn und bei Beendigung des Motorlaufes mit üblichem Dieselkraftstoff betrieben werden muss. Bei Betriebsbeginn ist dies notwendig, da mit dem Pyrolyseöl erst bei der Einstellung der optimalen Betriebstemperatur eine gute Verbrennung realisiert werden kann. Beim Abfahren des Motors kann auf ein längeres Spülen mit einem Reinigungsgemisch nicht verzichtet werden, da bei Abkühlen des Motors Rückstände von Pyrolyseöl unbedingt vermieden werden müssen. Diese würden sonst zu Verklebungen der beweglichen Elemente führen, die auch durch Reinigungsmittel nicht mehr zu lösen wären.

9 Gesetzliche Auflagen zum Bau und Betrieb

9.1 Genehmigungserfordernis

Die Zulassung zur Errichtung und zum Betrieb von umweltrelevanten Industrienlagen erfolgt grundsätzlich nach den Regelungen des BImSchG. Die Beurteilung über die Umweltrelevanz erfolgt im Anhang der 4. Verordnung zum Bundesimmissionsschutzgesetz (4. BImSchV), wo alle genehmigungspflichtigen Anlagen aufgelistet sind. Die Auflistung erfolgt in 2 Spalten, je nach Einschätzung der Umweltrelevanz. Anlagen der Spalte 1 werden als umweltgefährlicher eingeschätzt und werden somit in einem umfangreicheren Verfahren unter Beteiligung der Öffentlichkeit abgehandelt. Durch die Vorschrift der Öffentlichkeitsbeteiligung und die dafür festgelegten Zeitvorgaben muss bei einem derartigen Genehmigungsverfahren mindestens mit einer Dauer von 6 – 12 Monaten gerechnet werden. Genehmigungsverfahren der Spalte 2 können bei unkomplizierten Vorhaben in 3-4 Monaten abgearbeitet sein.

Da die realisierte Pilotanlage ein BHKW mit einer Feuerungswärmeleistung von 690 kW umfasst, fällt die Anlage unter die Genehmigungspflicht:

> Anlagen zur Erzeugung von Strom, Dampf, Warmwasser, Prozesswärme oder erhitztem Abgas durch den Einsatz anderer als der in Nummer 1.2 genannter fester oder flüssiger Brennstoffe[1] in einer Verbrennungseinrichtung (wie Kraftwerk, Heizkraftwerk, Heizwerk, Gasturbinenanlage, Verbrennungsmotoranlage, sonstige Feuerungsanlage), einschließlich zugehöriger Dampfkessel, mit einer Feuerungswärmeleistung von 100 Kilowatt bis weniger als ein Megawatt. [22]

Sofern mindestens eine der in der Anlage integrierten Betriebseinheiten im Anhang der 4. BImSchV genannt ist, so unterliegt gemäß § 1 Abs. 2 der 4. BImSchV automatisch die gesamte Anlage dem Genehmigungsbedürfnis, was impliziert, dass nicht nur die Genehmigungsfähigkeit des BHKWs zu überprüfen ist, sondern auch die aller angeschlossenen Anlagenteile und Nebenanlagen.

Die Regelungen zur Notwendigkeit einer Umweltvertäglichkeitsprüfung (UVP) sind den in Abs.1 Nr. 1c) aa) des UVPG angeführten Nebenbestimmung zu entnehmen. Ob eine UVP durchgeführt werden muss wird aber oft erst nach Einreichung des Antrags aufgrund der Prüfung der Unterlagen von behördlicher Seite entschieden und ist vor allem von der Standortwahl abhängig.

Doch auch wenn die Anlage ohne integrierte BHKW realisiert worden wäre, könnte sie aufgrund des Pyrolysators dennoch als genehmigungsbedürftig angesehen werden:

> Anlagen zur Trockendestillation, insbesondere von Steinkohle, Braunkohle, Holz, Torf und Pech (z.B. Kokereien, Gaswerke und Schwelereien) ausgenommen Holzkohlemeiler. [4. BImSchV, Anhang 1.11, Spalte 1]

Unter Destillation versteht man thermische Trennverfahren. Der in der gegenständlichen Anlage realisierte Prozess ist bezüglich seiner Prozessziele zwar nicht als thermisches Trennverfahren anzusehen, nach der verfahrenstechnischen Umsetzung ist der Pyrolyseprozess jedoch mit der Trockendestillation vergleichbar. Aus diesem Grunde ist davon auszugehen, dass eine Pyrolyseanlage ohne integrierte BHKW von behördlicher Seite als Anlage der Trockendestillation angesehen werden würde. Da Anlagen der Trockendestillation in Anhang 1 der 4. BImSchV aufgelistet sind, würde eine derartige Einschätzung auch zu einer Verkomplizierung des Genehmigungsverfahrens führen.

Die Immissionsschutzrechtliche Genehmigung hat Konzentrationswirkung, was bedeutet, dass sie weitere Genehmigungen wie z. B. natur- und landschaftsschutzrechtliche, sowie baurechtliche umfasst.

9.2 Baurechtliche Schwierigkeiten

Die Pilotanlage sollte in Zusammenarbeit mit dem Sägewerk Hagenah auf dem Betriebsgelände des Sägewerkes aufgestellt werden. Durch den räumlichen Zusammenschluss von Hackschnitzelbereitstellung und Hackschnitzelverarbeitung sind optimale Bedingungen gegeben, die Pilotanlage nicht durch Schwierigkeiten in der Zulieferung oder Qualität der Biomasse zusätzlich zu belasten. Die Realisierung dieser geplanten Zusammenarbeit wurde jedoch durch behördliche Einwände erschwert und verzögert. Grund dieser Einwände war die Tatsache, dass sich das Betriebsgelände der Fa. Hagenah im Aussenbereich befindet, d. h. kein Bebauungsplan für das Gebiet vorliegt. Das Sägewerk Hagenah besitzt die Genehmigung zum Betrieb des Sägewerks nur, da es bereits seit über 100 Jahren an benanntem Standort besteht.

Der von PYTEC gestellte Genehmigungsantrag wurde somit aus baurechtlichen Gründen zunächst abgelehnt, da für Vorhaben im Außengebiet erst ein Bebauungsplan beantragt und erstellt werden müsste. Da es sich bei dem geplanten Standort jedoch um ein Wasserschutzgebiet handelt, wäre die Erlaubnis der Bebauung mit einer industriellen Anlage sehr unwahrscheinlich gewesen. Um die Genehmigung zu Bau und Betrieb der Anlage erhalten zu können, musste das Sägewerk als Antragsteller fungieren. Denn der Fa. Hagenah kann nicht das Recht abgesprochen werden, das bestehende Werk um notwendige Anlagen zu erweitern. Auf diesem Wege konnte die Pyrolyseanlage auf einer Randfläche des Sägewerks genehmigt werden. Nachdem diese grundlegenden Standortfragen geklärt waren, konnte das Genehmigungsverfahren eingeleitet werden.

9.3 Beurteilung der Emissionen

9.3.1 Überblick

9.3.1.1 Luftverunreinigende Emissionen

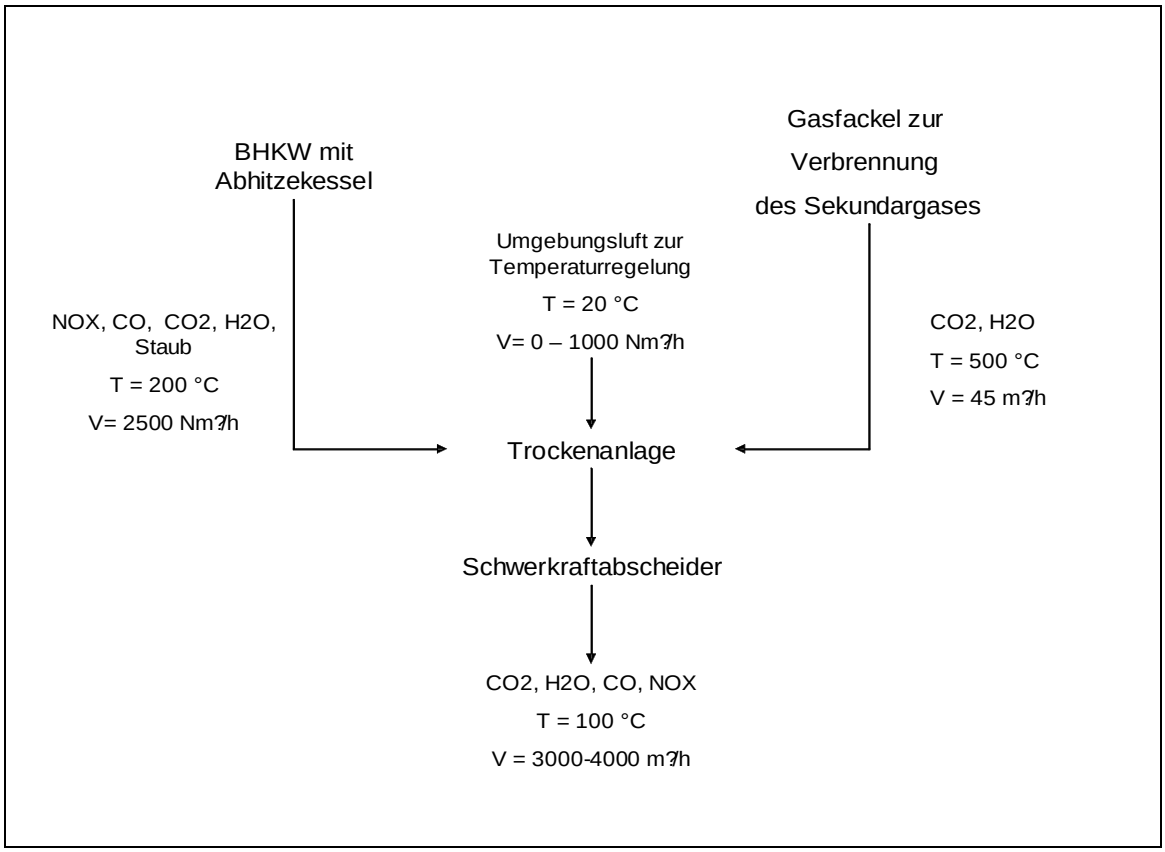


Abbildung 30: Quantitative Zusammensetzung des Abgasstroms

Die Anlage weist insgesamt nur eine direkte Abgasemissionsquelle auf. Der Abgasstrom dieser Emissionsquelle ist ein Verbrennungsabgas, das aus zwei Verbrennungseinrichtungen, dem BHKW und dem Gasbrenner, zusammengeführt wird. Nach der Zusammenführung wird das Abgas vor Verlassen der Anlage zur Trocknung des Aufgabeguts genutzt. Ferner wird die Temperatur des Gasstromes vor der Trockenanlage durch Zumischung von Umgebungsluft geregelt (siehe Abbildung 30).

Die gesamte Anlage überblickend sind die folgenden luftverunreinigenden Prozesse zu betrachten:

- Befüllung des Holzschnitzelcontainers (Holzstaub)
- Holztrocknung (Quelle für Holzstaub, Harzsäuren, etc.)
- Gasbrenner (Verbrennungsabgase)
- BHKW-Motor (Verbrennungsabgase)
- Nichtkontinuierliche Emissionen und Leckagen

Ferner können Emissionen von intensiven Geruchsstoffen auftreten, die bei der Holztrocknung und -pyrolyse entstehen.

9.3.1.2 Schallemissionen

Schallemissionen werden in der Regel von allen schwingenden und rotierenden Körpern ausgesandt. Bei der gegenständlichen Anlage werden Schallemissionen in erster Linie durch das BHKW verursacht. Mit weiteren kontinuierlichen Schallemissionen ist durch den Betrieb der Trockenanlage, der rotierenden Heizscheibe des Pyrolysators, sowie der vorhandenen Pumpen und Ventilatoren zu rechnen. Einzeln auftretende Schallemissionen werden durch die Befüllung des Holzschnitzelcontainers verursacht.

9.3.1.3 Sonstige Emissionen

Unter Emissionen versteht der Gesetzgeber neben luftverunreinigenden Emissionen und Schallemissionen ebenso Erscheinungen wie Licht, Wärme, Strahlung und Erschütterungen. Von der gegenständlichen Anlage werden außer Lichtemissionen keine weiteren Emissionsarten über die Bagatellwerte hinaus ausgehen. Bezüglich der Lichtemissionen ist erst von sicherheitstechnischer Seite zu klären, welche Ansprüche an die Beleuchtung der Anlage gestellt werden. Für den Fall, dass die Anlage im Dauerbetrieb mit konstanter Beleuchtung versehen werden muss, ist zu klären, wie diese gestaltet werden muss, damit die Lichtemissionen den standortbedingten Anforderungen genügen.

9.3.2 Luftverunreinigende Emissionen

9.3.2.1 Emissionen durch die Holztrocknung

Bei der künstlichen Holztrocknung, d. h. bei der Trocknung von Holz bei erhöhter Temperatur, erfolgt der Austrag von Wasser in deutlich kürzerer Zeit und konzentriert. Die vom Träger des Vorhabens gestellten Prognosen, die für die zu erwartenden Emissionen gestellt werden, basieren auf Erfahrungswerten, die in der Regel bei vergleichbaren Trocknungsprozessen auftreten.

In üblichen Trocknungsprozessen treten aufgrund der erhöhten Temperatur Hydrolysereaktionen auf, so dass niedermolekulare Alkohole, Aldehyde und Carbonsäuren freigesetzt werden. Somit enthält die Abluft der Schnittholztrocknung im Allgemeinen eine nicht unerhebliche Beladung geruchsintensiver Stoffe, sowie sowohl Partikel, als auch weitere organische und anorganische Stoffe. Die Geruchsstoffkonzentration in den Trocknerbrüden ist hoch. Im Mittel treten Geruchstoffkonzentrationen zwischen 3000 und 6000 GE/m³ auf. Die staubförmigen Emissionen enthalten neben Holzstaub ebenfalls feine Aerosole, bestehend aus Harzsäuren, Wachsen und Fetten.

Die gasförmigen organischen Emissionen enthalten je nach Aufgabegut und Trocknungsbedingungen zwischen 50 und 500 mg/m³ Monoterpene (Aromatische Stoffe, Hauptbestandteile ätherischer Öle). Ferner treten die durch Hydrolyse des Holzes freigesetzten Stoffe Methanol, Formaldehyd, Ameisensäure und Essigsäure auf. Typische Konzentrationswerte liegen zwischen 5 und 20 mg/m³ [25].

Für die gegenständliche Anlage liegen noch keine Messdaten aus Testfahrten vor. Gemäß den Angaben des Sägewerks sind die eingesetzten Holzschnitzel weitgehend staubfrei. Durch die Einfüllung in den Vorratscontainer und den Austrag der Holzschnitzel über den Schubboden ist jedoch mit Abrieb, und somit mit Verursachung von Staub zu rechnen.

9.3.2.2 Emissionen durch die Verbrennung des Sekundärgases

Der im Pyrolyseprozess anfallende nicht kondensierbare Gasanteil (Sekundärgas) soll genutzt werden, um die notwendige Heißluft für den Trocknungsprozess bereitzustellen. Zu diesem Zweck wird das Sekundärgas, welches in etwa den halben Heizwert von Erdgas aufweist (ca. 5 kWh/m³), über parallel geschaltete Gasbrenner verbrannt. Die typische Zusammensetzung des Sekundärgases in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** graphisch dargestellt.

Bei der Verbrennung ist mit den üblichen Emissionen von Verbrennungen von Schwachgas zu rechnen. Es ist bei der Darstellung der Anlage in den Unterlagen zu beachten, dass die Verbrennung des Sekundärgases nicht als thermische Nachverbrennung des im Pyrolyseprozess entstehenden Gases zu betrachten ist, sondern als Heizverfahren für die Holztrocknung (siehe TA-Luft, Abschnitt 5.2.4).

9.3.2.3 Emissionen durch den Betrieb des BHKW

Die Antriebseinheit des gegenständlichen BHKWs ist ein Dieselmotor mit einer Feuerungswärmeleistung von 690 kW. Bei Verbrennung von flüssigen Kraftstoffen befinden sich aufgrund unvollständiger Verbrennung typischerweise Ruß und polycyclische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) als Staubemissionen

im Abgas. Bei der Verwendung von Pyrolyseöl sind aufgrund der anderen Zusammensetzung und Eigenschaften des Brennstoffes andere Abgaswerte zu erwarten als bei der Nutzung von üblichem Dieselkraftstoff.

Bei Verbrennungsversuchen mit Pyrolyseöl hat sich gezeigt, dass das Holzpyrolysat im Gegensatz zu herkömmlichen Dieselkraftstoffen bei recht niedrigen Temperaturen verbrennt, was auf den hohen Wassergehalt des Produktes zurückgeführt werden kann. Dies hat zur Folge, dass die NO_X-Belastung der Abgase verhältnismäßig gering ist, während die CO-Belastung ansteigt. Da das Pyrolysat eine sehr sauerstoffreiche Flüssigkeit ist, vollzieht sich die Verbrennung in Dieselmotoren relativ vollständig, wodurch die Abgase nur eine geringe Trübung (Russ-/Staubbelastung) aufweisen.

Für die Nutzung von Pyrolyseöl in dem für die gegenständliche Anlage vorgesehenen Dieselmotor sind bei einer Testfahrt folgende Emissionswerte festgehalten worden, die richtungweisende Daten für die Einschätzung der Emissionen der geplanten Anlage bieten. Die Ergebnisse sind in Tabelle 15 dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass die Emissionswerte des eingesetzten Motors beim üblichen Dieselbetrieb wesentlich höhere NO_x-Konzentration aufweisen.

Tabelle 15: Abgaswerte bei der Nutzung von Pyrolyseöl in vorgesehenem Dieselmotor [27]

	Verbrennung im Dieselmotor (T= 448°C)
Kohlenstoffoxid als CO [mg/m³]	351
Stickstoffoxid als NO2 [mg/m³]	1433

Der eingesetzte Motor ist älterer Generation und generiert NO_x-Emissionen, die dem heutigen Stand der Technik nicht mehr gerecht werden. Da der Einsatz von Pyrolyseöl in Verbrennungsmotoren jedoch noch mit Schwierigkeiten verbunden ist, mit die für moderne Motoren nicht verkraftbar sind, muss auf dieses Dieselaggregat zurückgegriffen.

Über weitere relevante Emissionswerte lassen sich nur durch die vergleichende Betrachtung der Eigenschaften von Pyrolyseöl und herkömmlichen Dieselkraftstoff Prognosen erstellen. Pyrolyseöl beinhaltet typischerweise mehr als 70 verschiedene chemische Verbindungen [26], die über ein breites Spektrum von Molekülgrößen und –eigenschaften verteilt sind, von niedermolekularen, leicht flüchtigen Aldehyden und Carbonsäuren bis zu hochmolekularen kompliziert aufgebauten Cellulose- und Ligninverbindungen. Die physikalisch-chemischen Eigenschaften von Pyrolyseöl sind in Abhängigkeit des Rohstoffes und des Pyrolyseverfahrens veränderlich. In Tabelle 16 sind typische Eigenschaften von Pyrolyseölen aus dem Flash-Pyrolyseprozess und im Vergleich mit anderen

üblichen Kraftstoffen aufgeführt. Eine vergleichende Betrachtung der Kraftstoffzusammensetzung lässt weitere Prognosen zum Emissionsverhalten zu.

Aus den in der Tabelle dargestellten Werten wird ersichtlich, dass der Sauerstoffgehalt von Holzpyrolysat mehr als das vierfache beträgt, als der Sauerstoffgehalt von sonstigen Energieträgern, während der Kohlenstoffgehalt um mehr als 25% geringer ist. Aufgrund des hohen Sauerstoffgehalts wird bei der Verbrennung des sauerstoffreichen und kohlenstoffarmen Pyrolyseöls bedeutend weniger Luftsauerstoff benötigt, als bei der Verbrennung üblicher Energieträger. Zur Realisierung der Verbrennung von Holzpyrolysat bedarf der Motor also wesentlich weniger Luftsauerstoff als bei der Verbrennung von normalem Dieselkraftstoff.

Tabelle 16: Elementaranalyse in Gew.% flüssiger Energieträger

	C	H	O	N	S
	in Gew.% (wasserfrei)				
Diesel	86	14	-	-	-
Rapsöl	77,8	12	10,9	0,04-0,2	0,02
Sojaöl	77,8	11,8	10,7	0,2	0,01
Rapsmethylester	77,3	11,9	10,8	-	-
Holzpyrolysat	57	8	46	1	-

Quellen: Ökoinstitunt e.V.2004, FÖS 1998, Hartmann 1998, Ökotherm 1995, BFH 2005

Aussagekräftige Untersuchungen über die Auswirkungen des hohen Sauerstoffgehaltes bei der Verbrennung wurden noch nicht verwirklicht. Es ist anzunehmen, dass sich durch den hohen Sauerstoffgehalt auch in den Abgasen verhältnismäßig viel Sauerstoff befinden wird.

Da im Pyrolyseöl kein Schwefel enthalten ist, ist eine Schwefeloxidbelastung im Abgas ausgeschlossen. Anteile von Stoffen, die hinsichtlich ihrer Eigenschaften und ihres Gehaltes sonstige schädliche Abgase generieren, sind nicht bekannt.

9.3.2.4 Nichtkontinuierliche Emissionen und Leckagen

Unter nicht kontinuierlichen Emissionen sind solche zu vermerken, die über absehbare Zeitspannen gelegentlich oder regelmäßig auftreten.

Emissionen durch Wartungs- und Reinigungsarbeiten. Reinigungsarbeiten müssen regelmäßig durchgeführt werden, wenn die Anlage abgefahren wird. Die Pyrolyseöl führenden Bereiche, in denen Gefahr von Verklebung oder Verstopfung herrscht, müssen mit Hilfe von Ethanol gereinigt werden. Beim Öffnen bestimmter Anlagenteile, die Pyrolyseöl führen, ist durch die im Öl enthaltenen aromatischen Stoffe mit Geruchsemissionen zu rechnen.

Eine Aussage über die Häufigkeit, mit der Wartungs- und Reinigungsarbeiten anfallen werden, kann aufgrund nicht vorhandener Erfahrungswerte nicht getroffen werden.

Emissionen durch die Befüllung des Holzschnitzelcontainers. Beim Umschlagen von festen Stoffen treten regelmäßig Staubemissionen auf. Die Stärke dieser Emissionen hängt von der Beschaffenheit des Aufgabeguts und des Umschlagverfahrens ab. Im gegenständlichen Vorhaben sollen die Holzhackschnitzel im feuchten Zustand mit Hilfe eines Baggers, also durch ein offenes Umschlagverfahren, in den Container eingefüllt werden. Das umzuschlagende Gut ist feucht und nur in geringen Maßen staubhaltig. Ferner ist Holzstaub kein toxischer Stoff (mit Ausnahme von kanzerogen wirkendem Eichen- oder Buchenholzstaub), zusätzlich ist die Gefahr einer Staubexplosion durch die Feuchte nicht gegeben.

Schleichleckagen. Unter Schleichleckagen werden unbeabsichtigte aus der Anlage austretende Stoffströme verstanden, die über sogenannte diffuse Quellen emittiert werden. Diese treten hauptsächlich in Form von austretenden Gasen auf, ebenso ist aber auch das Auftreten von Schleichleckagen in Form von Flüssigkeiten oder Feststoffen (z. B. Stäuben) zu beachten. Schleichleckagen von wassergefährdenden Flüssigkeiten werden durch die doppelwandige Ausführung der Flüssigkeit führenden Teile verhindert. Mit relevanten Leckageströmen von Stäuben ist aufgrund der geringen Mengen nicht zu rechnen.

Bei bestimmungsgemäßem Betrieb können von der geplanten Anlage keine gasförmigen Schleichleckagen ausgehen, da in den Gas führenden Anlagenteilen im Normalbetrieb Unterdruck gehalten wird. Bei Auftreten von Gleich- oder Überdruck in den Gasführenden Anlagenteilen können über diffuse Quellen (hauptsächlich Undichtigkeiten am Reaktorgehäuse des Pyrolysators) Leckageströme auftreten. Durch die geringe Anlagengröße kommen jedoch kaum beachtliche Stoffströme zusammen. Treten gasförmige Schleichleckagen auf, so sind diese durch die Beladung geruchsintensiver Stoffe leicht detektierbar. Das bedeutet gleichzeitig, dass mit dem Auftreten von Schleichleckagen Geruchsemissionen einhergehen.

Hinsichtlich der Tatsache, dass es sich bei dem gegenständlichen Vorhaben um eine Pilotanlage handelt, können keine sicheren Angaben zu den zu erwartenden Schleichleckagen gemacht werden. Insbesondere zu den dadurch verursachten Geruchsemissionen und der Menge der austretenden Geruchseinheiten (GE) können vor Beginn des Probebetriebs keine Aussagen getroffen wer-

den, da diese sehr davon abhängen, wie gleichmäßig der Unterdruck im Reaktor aufrechterhalten wird. Zudem ist eine Messung zu den olfaktorischen Schwellenwerten der beteiligten Geruchstoffe bis dato noch nicht durchgeführt worden.

9.3.3 Schallemissionen

Schallemissionen können für die meisten Anlagenteile nur theoretisch ermittelt werden, da sich diese zum Zeitpunkt der Antragstellung erst noch in Fertigung oder Montage befinden. Die theoretische Berechnung von Schallemissionen gestaltet sich in der Praxis recht aufwendig. Aus diesem Grund werden im Antrag Schallemissionswerte nur für das BHKW angegeben, für dessen Emissionsverhalten Messwerte vorliegen.

Der Hersteller des BHKW garantiert, dass die Schallemissionen in 10 m Abstand den Pegel von 75 dB nicht überschreiten. Dies wird durch schwingungsdämpfende Lagerung des Motors und durch Schalldämmung der Containerwände gewährleistet werden.

Für weitere Maschinen- und Anlagenteile ist zur Emissionsminderung lediglich die Schalldämmung der Containerwand vorgesehen. Da am geplanten Standort bereits eine hohe Vorbelastung besteht, wird die Zusatzbelastung voraussichtlich als irrelevant einzustufen sein.

9.3.4 Auflagen seitens der Behörde

9.3.4.1 Behördlicher Entscheidungsspielraum

Der Behörde wird vom Gesetzgeber ein Entscheidungsspielraum eingeräumt, der in Form eines Beurteilungs- oder eines Ermessensspielraumes vorliegen kann. Ein Beurteilungsspielraum liegt vor, wenn der Gesetzestext unbestimmte Rechtsbegriffe (z.B. schädliche Umwelteinwirkungen) enthält, und diese auch in weiteren Verordnungen oder Verwaltungsvorschriften nicht eindeutig konkretisiert sind. Ein Ermessensspielraum liegt dann vor, wenn dieser im Gesetzestext eindeutig festgelegt wird. In der Regel verfügen die Behörden durch die Verwaltungsvorschriften TA-Luft und TA-Lärm bei der Entscheidung über luftverunreinigende Emissionen und Schallemissionen über keinen Spielraum. In der TA-Luft sind für alle genehmigungspflichtigen Anlagen Grenzwerte bezüglich zulässiger Emissionen festgelegt. Die TA-Lärm determiniert die Grenzwerte von Schallemissionen bezogen auf die Anlagenstandorte.

Da es sich bei Anlage des gegenständlichen Projektes jedoch um eine Pilotanlage handelt, die sich nicht vollständig einer Anlagenkategorie der TA-Luft zuordnen lässt, werden folgende Passagen der Verwaltungsvorschrift wirksam:

Abschnitt 5.4 Absatz 1:

> Die in Nummer 5.4 enthaltenen besonderen Anforderungen für bestimmte Anlagenarten sind entsprechend dem Anhang der Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen geordnet und gelten nur für die jeweils genannten Anlagenarten.

Abschnitt 5.1.1, Absatz 4:

> Für Anlagen, die nur einmal in Deutschland vorkommen, werden keine Regelungen in Nummer 5.4 festgelegt; in einem solchen Fall hat die zuständige Behörde die technischen Besonderheiten in eigener Verantwortung zu beurteilen.

Für die Fälle, in denen der angeführte Abschnitt der TA-Luft Gültigkeit besitz, erhält die Behörde, wie aus dem Gesetzestext ersichtlich, einen erheblichen Entscheidungsspielraum, wobei die Beurteilung anhand von Normen und Richtlinien zu erfolgen hat, was in der TA-Luft unter Abschnitt 5.1.1 wie folgt kommentiert wird:

> Soweit die Nummern 5.2 oder 5.4 keine oder keine vollständigen Regelungen zur Begrenzung der Emissionen enthalten, sollen bei der Ermittlung des Standes der Technik im Einzelfall BVT-Merkblätter oder Richtlinien oder Normen des VDI/DIN-Handbuches Reinhaltung der Luft als Erkenntnisquelle herangezogen werden .

Da Pyrolyseöl bei dem geplanten Vorhaben weltweit erstmals in einem Verbrennungsmotor zur Erzeugung von Strom und Wärme eingesetzt wird, kann das BHKW als „Anlage, die nur einmal in Deutschland vorkommt“ angesehen werden. Die Behörde hat somit die Verpflichtung, innerhalb des gesetzlichen Rahmens, nach eigenem Ermessen über die Anlage zu urteilen. Durch diese Tatsache erhöht sich die Verantwortung der Behörde bei der Entscheidung und führt automatisch zu einer Vertiefung und zeitlichen Verzögerung bei der Prüfung des Vorhabens.

Wie unter 5.4 Absatz 1 angemerkt, werden bestimmte Anlagenarten „entsprechend dem Anhang der Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen geordnet“ behandelt. Dabei ist zu beachten, dass die Einteilungen in Anlagenarten im Anhang der genannten Verordnung (4. BImSchV) und unter Abschnitt 5.4 der TA-Luft nicht vollständig deckungsgleich sind. Dadurch können Unklarheiten entstehen, ob in der Verwaltungsvorschrift angegebene Grenzwerte auf eine bestimmte Anlage anwendbar sind. Die Entscheidung über die festzulegenden Emissionsgrenzwerte der Anlage konnte somit nicht als Routineverfahren abgearbeitet werden und erforderte somit den entsprechenden Zeitaufwand.

9.3.4.2 Allgemeine Hinweise bezüglich des Beurteilungsspielraumes

Bei der gegenständlichen Pilotanlage handelt es sich um eine Anlage, die zu Zwecken der Entwicklung der Qualität und des Einsatzes neuartiger Biokraftstoffe errichtet werden soll. Bei dem geplanten Projekt werden folgende Technologien zum Schutze der Umwelt vereint:

- Produktion eines Kraftstoffes aus nachwachsenden Rohstoffen
- Maximale Ausnutzung der eingesetzten CO_2-neutralen Energie durch Kraft-Wärme-Kopplung (KWK-Anlage)
- Vermeidung von Schwefeloxidemissionen durch schwefelfreien Kraftstoff

Bei der Betrachtung des Emissionsverhaltens wird der Blick hauptsächlich auf das BHKW, die Gasbrenner und die Trocknungsanlage gerichtet. Von den übrigen Betriebseinheiten sind keine relevanten Emissionsströme zu erwarten.

Die technische Besonderheit der emissionsrelevanten Betriebseinheiten besteht im Einsatz eines neuartigen Brennstoffes, der aufgrund seiner physikalischen und chemischen Eigenschaften in Verbrennungsmotoren andere Emissionen generiert als herkömmlicher Dieselkraftstoff oder standardisierte Kraftstoffe aus Pflanzenölen. Besonders der Hohe Anteil an Wasser und sauerstoffhaltigen organischen Verbindungen wirken sich auf das Emissionsverhalten aus. Ferner ist zu beachten, dass der Einsatz des Holzpyrolysats in Verbrennungsmotoren durch die hohe Viskosität, die hohe Korrosivität und den geringen Energiegehalt noch mit Schwierigkeiten verbunden ist.

In Abschnitt 5.1.3 Absatz 2 wird gefordert, dass die Emissionsbegrenzenden Maßnahmen „dem Stand der Technik entsprechen“ müssen. Für Pilotanlagen und den Einsatz neuartiger Technologien wird der zuständigen Behörde bei der Beurteilung des Standes der Technik immer ein weiterer Spielraum gegeben sein, als bei standardisierten Anlagen. Zur Bestimmung des Standes der Technik sind eventuell Sachverständigengutachten einzuholen.

9.3.4.3 Einschätzung der BHKW-Emissionen durch die Behörde

Gemäß des Anhangs der 4. BImSchV fällt die Anlage aufgrund des integrierten BHKW unter die Kategorie 1.3 Spalte 2 (Anlagen zur Erzeugung von Strom ... durch den Einsatz anderer als in Nummer 1.2 genannter fester oder flüssiger Brennstoffe ... mit einer Feuerungswärmeleistung von 100 Kilowatt bis weniger als 1 Megawatt). Anlagen von einer Feuerungswärmeleistung von weniger als 1 MW die mit üblichen genormten Kraftstoffen betrieben werden, fallen nicht unter die Genehmigungspflicht nach BimSchG. Die TA-Luft sieht für Anlagen dieser Kategorie nur dann anlagenspezifische Regelungen unter 5.4 vor, wenn diese durch den Einsatz von Stroh oder ähnlicher pflanzlicher Stoffen (z. B. Getreidepflanzen, Gräser, Miscanthus) betrieben werden. Somit können die unter 5.4.1.3 festgelegten Grenzwerte für das gegenständliche Vorhaben nicht angewendet werden.

Darauf beruhend berief sich die Genehmigungsbehörde auf die Regelungen, die unter 5.4.1.4 getroffen werden. Unter den anlagenspezifischen Regelungen in Nummer 5.4.1.4 werden nicht nur Verbrennungsmotoranlagen der Kategorie 1.4 des Anhangs der 4. BImSchV behandelt, sondern ebenfalls Verbrennungsmotoranlagen der Kategorie 1.1 und 1.2. Verbrennungsmotoranlagen der Kategorie 1.3 werden nicht explizit in den Geltungsbereich eingeschlossen.

Nach den Festlegungen im Anhang der 4. BImSchV unterscheiden sich die Anlagen unter 1.3 von denen unter 1.1, 1.2 und 1.4 im Bereich der Feuerungswärmeleistung und der eingesetzten Brennstoffe. Anlagen mit einer Feuerungswärmeleistung von weniger als 1 MW fallen, sofern sie aufgrund des eingesetzten Brennstoffes überhaupt der Genehmigungspflicht unterliegen, in die Kategorie 1.3. Da unter der Nummer 5.4.1.4 jedoch an keiner Stelle untere Grenzen der Feuerungswärmeleistung zur Definition des Geltungsbereichs gemacht werden, beschloss die Behörde für das gegenständliche Vorhaben, dass die angegebenen Emissionswerte auch bei Feuerungsanlagen unter 1 MW anzuwenden sind.

Folgende Grenzwerte wurden somit für die Anlage festgelegt:

Tabelle 17: Emissionsgrenzwerte für Anlagen der Nummer 1.4

Bezugssauerstoff	5	%
Gesamtstaub	20	mg/m³
Kohlenmonoxid	0,3	g/m³
Stickstoffoxide	1,0	g/m³
Schwefeloxide	Kraftstoffabhängig	
Org. Stoffe (Formaldehyd)	60	mg/m³

Dadurch, dass in der Anlage jedoch ein neuartiger Brennstoff eingesetzt wird, der sich durch seine physikalischen und chemischen Eigenschaften (siehe 9.3.2.3) erheblich von den sonstigen in der TA-Luft aufgeführten flüssigen Brennstoffen unterscheidet, bleibt zu diskutieren, ob die Anwendung der unter 5.4.1.4 geforderten Emissionsgrenzwerte für die gegenständliche Anlage akzeptabel ist. Durch die besonderen Eigenschaften des Eingesetzten Kraftstoffes (hoher Sauerstoffgehalt, hoher Wassergehalt, niedriger Kohlenstoffgehalt) ist mit einem anderen Emissionsverhalten zu rechnen als beim Einsatz üblicher Brennstoffe. Wie unter 5.4.2 dargestellt, wird insbesondere mit einem höheren Sauerstoffgehalt im Abgas gerechnet. Ferner wird die Kohlenmonoxidbelastung

aufgrund der vergleichsweise niedrigen Verbrennungstemperaturen relativ hoch, die Stickoxidbelastung relativ niedrig sein.

Aus diesen Gründen legte die Behörde fest, dass erst nach Abschluss der Erprobungsphase unter Berücksichtigung der Ergebnisse der messtechnischen Begleitung abschließend bestimmt werden soll, ob die Emissionsbegrenzungen der unter 5.4.1.4 der TA-Luft aufgeführten auch für die Anlage verbindlich gemacht werden. Sollte die Behörde sich dagegen entscheiden, gelten die im allgemeinen Teil der Ziffer 5.2 der TA-Luft angegebenen Grenzwerte.

9.3.4.4 Bestimmungen zu sonstigen luftverunreinigenden Emissionen

Für den Abgasstrom aus der Gasverbrennung, sowie die Verunreinigungen durch die Holztrocknung wurden die hierfür üblichen Grenzwerte festgelegt.

Für die Errichtung, die Beschaffenheit und den Betrieb des Standardbrenners für die Gasverbrennung des Sekundär-Pyrolysegases finden die Bestimmungen der 1. Verordnung zur Durchführung des Bundesimmissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen) Anwendung.

Nach Durchleitung der heißen Abgase des BHKWs durch den Trocknungscontainer dürfen die Abgase mit einer maximalen Resttemperatur von ca. 80 ° C an die Atmosphäre abgegeben werden. Nach den Bestimmungen der Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft muss die Ableitung der Abgase in einer Höhe von mind. 10 m über Flur und einer das Containerdach uni 3 m überragende Höhe erfolgen. Die Mündung der Abgasleitung soll jedoch das 2-fache der Gebäude-/Containerhöhe nicht überragen.

Die Geruchsemissionen der Anlage sind so zu begrenzen, dass die Zusatzbelastung der Anlage - IZ - unter Berücksichtigung der Vorbelastung - IV - im Einwirkbereich der Anlage zu einer Gesamtbelastung - IG - führt, die die Immissionswerte von 0,15 (15 %) an der nächstgelegenen Wohnbebauung nicht überschreitet. Die Angabe des Immissionswertes muss als relative Häufigkeit der Geruchsstunden erfolgen.

9.3.4.5 Kontrolle der festgelegten Grenzwerte

Die Einhaltung der festgelegten Emissionsbegrenzungen ist nach der Erprobungsphase wiederkehrend nach Ablauf eines Zeitraumes von jeweils 3 Jahren durch eine nach § 26 Bundes-Immissionsschutzgesetz bekannt gegebene Stelle prüfen zu lassen. Diese kann durch Einzelmessungen entsprechend Nr. 5.3.2 der TALuft nachgewiesen werden. Es sind mindestens 3 Einzelmessungen durchzuführen. Das Ergebnis der Einzelmessungen ist als Halbstundenmittelwert zu ermitteln und anzugeben. Die Emissionsbegrenzungen gelten als ein-

gehalten, wenn die Massenkonzentration oder der Massenstrom von Luftverunreinigungen im Abgas bei jeder Einzelmessung nicht überschritten werden.

Über das Ergebnis der Messungen ist ein Messbericht zu erstellen, der Angaben enthalten muss über

- die Messplanung
- das Ergebnis jeder Einzelmessung
- das verwendete Messverfahren und
- die Betriebsbedingungen, die für die Beurteilung der Einzelwerte und der Messergebnisse von Bedeutung sind. Hierzu gehören u. A. Angaben über Brenn- und Einsatzstoffe sowie über den Betriebszustand der Anlage und der Abgasreinigungseinrichtungen.

9.4 Gefährdungsbeurteilung

Die Beurteilung der Anlage bezüglich des Arbeitsschutzes und der technischen Sicherheit wird ebenfalls im Genehmigungsverfahren nach BImSchG durchgeführt. Bei der Überprüfung finden standardmäßig die Regelungen des Bundesimmissionsschutzgesetzes, des Wasserhaushaltsgesetzes, der Verordnung über Anlagen wassergefährdender Stoffe und der Betriebssicherheitsverordnung, sowie die allgemein anerkannten Regeln der Technik Anwendung.

Hinsichtlich der Tatsache, dass einige Anlageneinheiten in gegenständlichem Projekt erstmalig großtechnisch realisiert wurden, konnte die Anlage durch die genannten Standardwerke nicht abschließend bewertet werden. Verfügt die Behörde selbst nicht über den notwendigen Sachverstand, um die Genehmigungsfähigkeit des Vorhabens ausreichend zu prüfen, ist sie berechtigt für entscheidungserhebliche Fragen Gutachten von geeigneten Sachverständigen einholen. Geeignete Sachverständige sind entweder private oder öffentliche Organisationen (TÜV, Forschungsinstitute) oder natürliche Personen. Die Beauftragung des Sachverständigen geschieht in der Regel durch die Behörde. In Abstimmung mit dieser kann jedoch auch der Antragsteller notwendige Gutachten in Auftrag geben.

Um sicherheitstechnische Fragen auszuräumen mussten somit von zwei sachverständigen Stellen Gutachten zur Gefahrenbeurteilung eingeholt. Herr Dr. Meier von der Bundesforschungsanstalt für Holz und Forstwirtschaft nahm eingehend Stellung zur Technologie der ablativen Flashpyrolyse, Herr Dr.-Ing. Heier der DEKRA Umwelt GmbH konzentrierte seine Betrachtungen auf die anlagentechnische Realisierung.

Ferner wurde von der Behörde die Verfassung von Betriebsanweidungen für die Inbetriebnahme und den Betrieb gefordert, die auch Sofortmaßnahmen zur Vermeidung erhöhter Emissionen umfassen müssen. Die Betriebsanweisungen

sind unter Berücksichtigung der einschlägigen technischen Regeln und Unfallverhütungsvorschriften, Richtlinien und Merkblätter der zuständigen Berufsgenossenschaft aufzustellen. Ebenso wird verlangt, ein umfassendes Betriebshandbuch, sowie ein Explosionsschutzdokument zu erstellen.

9.5 Beurteilung der Abfall- / Abwassersituation

In der gegenständlichen Anlage anfallender Abfall ist nach Beschaffenheit und Menge unproblematisch. Als Abfall tritt lediglich Verbrauchsmaterial, das bei Reinigung und Wartung entsteht, auf. Im Pyrolyseprozess selbst entsteht kein Abfall, so dass keine permanent betriebene Abfallentsorgung notwendig wird. Somit wurden diesbezüglich auch seitens der Behörden keine besonderen Auflagen oder Bestimmungen angegeben.

Für die Lagerung der benötigten flüssigen Brenn- und Reinigungsstoffe wurden die üblichen strengen Auflagen getroffen (Werkstoffeignung, Auffangwannen, Leckagesonden, etc.), gemäß den Wassergefährdungsklassen der jeweiligen Flüssigkeiten. Zum Zeitpunkt der Antragserstellung lagen noch keine umfassenden Untersuchungsberichte über physikalisch-chemischen, sowie toxikologischen Eigenschaften von Pyrolyseöl vor. Seitens der Behörde wurde das Produktöl hinsichtlich seiner Gefährdungsklasse wie fossiles Öl behandelt. Nach Erscheinen des umfassenden Berichtes des EU-Projektes BIOTOX, in dem unter anderem das ökotoxikologische Verhalten und die biologische Abbaubarkeit behandelt werden, liegt der Behörde nun zur Beurteilung ausreichendes Informationsmaterial vor. Hinsichtlich der Untersuchungsergebnisse von Biotox verhält sich Pyrolyseöl gutartig im Kontakt mit Algen und keinen Wassertieren und weist eine gute biologische Abbaubarkeit vor. Unter Betrachtung dieser Gesichtspunkte werden die Auflagen für die Lagerbedingungen von Pyrolyseöl gelockert werden müssen. Dies kann jedoch nur durch die Stellung eines Änderungsantrags erfolgen.

9.6 Einschätzung seitens des Natur- und Landschaftsschutz

Die Beeinträchtigung von Natur und Landschaft durch die Anlage wurde als gering angesehen, so dass lediglich die Bereitstellung von Ausgleichsflächen für die zusätzlich versiegelte Bodenfläche zu schaffen war.

10 Öffentlichkeitsarbeit

10.1 Vorträge:

- Biomassetagung, Bergakademie, Freiberg, Sachsen, 2004
- Science in Thermochemical Biomass Conversion, Vancouver, 2004
- DGMK Fachtagung Energetische Nutzung von Biomassen, Velen VI, 2004
- Dechema, Frankfurt, 2005
- DGMK-Sitzung, Clausthal-Zellerfeld, 2005
- FEE, Sitzung des AK Vergasung, 2005
- VDI-GVC-Sitzung, Uni-Karlsruhe, 2005
- PR-Veranstaltung mit dem Hause Habsburg, Hamburg, 2005
- BFH Tag der offenen Tür, Hamburg, 2005
- ACHEMA, Frankfurt, 2006
- Fachtagung Thermochemische Umwandlung von Biomassen, FH Flensburg, 2006
- ThermalNet Meeting, Lille, Frankreich, 3. – 6. April 2006
- Int. Tagung Pyrolysis 2006, Budapest, 2006
- GDCh Ortsgruppe, Uni Rostock 2006
- VDI-Lüneburg, 2006
- DGMK Fachtagung Energetische Nutzung von Biomassen, Velen VII,.2006
- 4. Pflanzenölfahrertreffen, Rosenow, Deutschland, 30.09.2006
- Biorefinica, Osnabrück, Deutschland, 11. – 12. Oktober 2006
-

10.2 Messen:

- IFAT München, 2002, Stand PYTEC - MEL
- Hannover Messe, Energy 2005, Stand Land Niedersachsen
- LIGNA, Hannover 2005
- Hannover Messe, Energy 2006, Stand Land Niedersachsen
- TUTECH Chancen und Perspektiven der Nutzung von Bioenergie in Form von Biokraftstoffen, Hamburg, 17. März 2006

10.3 Publikationen

- PYNE – Newsletter – Issue 17: New ablative Pyrolyser in Operation in Germany
- Meier, D., S. Schöll, and H. Klaubert. 2004. Patentanmeldung: Verfahren und Vorrichtung zur Pyrolyse von Biomasse Patent WO 2004/076591 A1. Date Issued: 10.09.2004 2004.
- Meier, D., S. Schöll, H. Klaubert, and J. Markgraf. 2006. Betriebsergebnisse der ersten BTO-Anlage zur ablativen Flash-Pyrolyse von Holz mit Energiegewinnung in einem BHKW, p. 115-120 DGMK-Fachbereichstagung "Energetische Nutzung von Biomassen", 24. - 26. August 2006. DGMK, Velen.
- Schöll, S., H. Klaubert, and D. Meier. 2004. Holzverflüssigung durch Flash-Pyrolyse mit einem neuartigen ablativen Pyrolysator, p. 47-54 DGMK Tagungsbericht 2004-1 Beiträge zur DGMK-Fachbereichstagung "Energetische Nutzung von Biomassen", 19.-21.April 2004 in Velen/Westf.
- Schöll, S., H. Klaubert, and D. Meier. 2006. Bio-oil from a new ablative pyrolyser, p. 1372-1378, In A. V. Bridgwater and D. G. B. Boocock, eds. Science in Thermal and Chemical Biomass Conversion, Vol. 2. CPL Press, Newbury, UK.

10.4 Presse:

- Hamburger Abendblatt – 17. März 2006 – Holzhackschnitzel als Ölquell

11 Ergebnisbetrachtung

11.1 Wirtschaftlicher und wissenschaftlicher Erfolg

Wissenschaftlicher Erfolg. Auf zwei Entwicklungsschienen wurde ein beachtlicher wissenschaftlicher Erfolg erzielt, zum einen auf dem Gebiet der Flash-Pyrolyse und zum anderen bei der energetischen Verwertung der Pyrolyseöle.

Es gelang, die Machbarkeit der ablativen Flashpyrolyse sowohl im Labormaßstab, als auch im industriellen Maßstab zu demonstrieren. Somit gewann die Technologie der Flashpyrolyse einen neuen Verfahrenszweig hinzu, der aufgrund seines geringen energie- und anlagentechnischen Aufwandes entscheidende Vorteile gegenüber anderen Verfahren bietet.

Des Weiteren konnten entscheidende Fortschritte bei der energetischen Nutzung von Pyrolyseöl verzeichnet werden, durch den Einsatz in einem Dieselmotor zur Produktion von Strom und Wärme. Dies stellt einen Durchbruch bei den Anwendungsmöglichkeiten der Öle dar, die bis dato nur zu Heizzwecken oder als Chemierohstoffe genutzt werden konnten.

Wirtschaftlicher Erfolg. Die PYTEC wurde mit dem Ziel gegründet, eine neue Technologie zur energetischen Nutzung von Biomasse zu entwickeln. Dabei war von Beginn an das Ziel gesetzt, innerhalb eines möglichst kurzen Zeitrahmens die Entwicklung zur Marktreife zu bringen. Das Projektziel konnte erreicht werden, so dass die PYTEC nun mit Ihrer Analgentechnik auf den Markt kommen wird. Auf Basis der an der Prototypenanlage gewonnenen Daten konnten für die unterschiedlichen Anlagengrößen Wirtschaftlichkeitsberechnungen aufgestellt werden (siehe Anlage). Hinsichtlich der hohen Nachfrage nach Anlagen zur energetischen Nutzung von Biomasse, ist mit einer beträchtlichen Anzahl an Aufträgen zu rechnen.

11.2 Ausblick – Weiterführende Projektvorhaben

Aktuell besteht eine sehr große Nachfrage für Anlagen zur energetischen Nutzung von Holz und anderen Biomassen, sowohl auf dem heimischen, als auch dem internationalen Markt. Da die ablative Flashpyrolyse gegenüber konkurrierenden Technologien diverse entscheidende Vorteile bietet, wird dieser Technologie großes Interesse entgegengebracht, sowohl zur Nutzung landwirtschaftlicher, als auch zur Nutzung forstwirtschaftlicher Produkte.

Die PYTEC wird in naher Zukunft in zwei Linien aktiv sein. Zunächst wird die entwickelte Technologie in Anlagen mittlerer Kapazität (48 to/d Biotrockenmasse) in den Markt eingeführt. Diese Anlagen werden anfangs für die Verarbeitung von Holz ausgelegt und in Betriebsgemeinschaften mit den jeweiligen Käufern oder Investoren genutzt werden. Zum andern wird sich die PYTEC ebenso

stark auf die Weiterentwicklung Pyrolysetechnik konzentrieren. Hier wird es darum gehen, das Verfahren hinsichtlich Energieeinsatz, Standzeiten und Produktausbeuten zu optimieren, und vor allem auch die Flashpyrolyse für den Einsatz anderer Biomassen zur Marktreife zu bringen. Hier hat PYTEC besonders heimische Halmgüter und Einjahrespflanzen im Fokus.

Momentan ist die Errichtung von drei Holzpyrolyseanlagen mit einer Kapazität von jeweils 48 tato in Planung. Zwei Projekte sollen aufgrund der großen Ressourcen an Holz im Landkreis Ludwigslust, Mecklenburg-Vorpommern, realisiert werden. Standort der dritten Anlage wird voraussichtlich an der Saar nahe der französischen Grenze sein. Die Upscaling der Pilotanlage wird darin bestehen, mehrere Einheiten der erprobten Anlage nebeneinander zu staffeln. Durch dieses Konzept wird den anlagentechnischen Risiken, die ein Upscaling in sich birgt, aus dem Weg gegangen.

Die PYTEC wird sich nicht ausschließlich auf deutsche Märkte konzentrieren. Das Patent zu der entwickelten Technologie wurde bereits weltweit in den maßgeblichen Regionen angemeldet.

12 Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: TECHNISCHE POTENZIALE UND NUTZUNG BIOGENER FESTBRENNSTOFFE [1]. 8
TABELLE 2: ANFORDERUNGEN AN DIE EIGENSCHAFTEN VON PYROLYSEÖLEN [8]. 14
TABELLE 3: PRODUKTAUSBEUTEN BEI UNTERSCHIEDLICHEN PROZESSFÜHRUNGEN [17] 21
TABELLE 4: EIGENSCHAFTEN UND ZUSAMMENSETZUNG VON PYROLYSEÖL [9] 25
TABELLE 5: IM BETRIEB BEFINDLICHE ANLAGEN ZUR FLASH-PYROLYSE VON BIOMASSE 29
TABELLE 6: DIE ABLATIVE FLASH-PYROLYSE IM VERGLEICH ZUR WIRBELSCHICHT [17]33
TABELLE 7: PYROLYSEÖL IM VERGLEICH ZU ANDEREN FLÜSSIGEN ENERGIETRÄGERN .35
TABELLE 8: DIVERSE PYROLYSEÖLE IM VERGLEICH, QUELLE: [7].....35
TABELLE 9: EIGENSCHAFTEN UND EMISSIONEN NACH GUST, [6] ... **FEHLER! TEXTMARKE NICHT DEFINIERT.**
TABELLE 10: ÜBERBLICK UND MITTELWERTE DER MESSUNGEN DER LABORPYROLYSE 60
TABELLE 11: BEISPIELE EINIGER PRODUKTANALYSEN 62
TABELLE 12: DATEN DES TESTMOTORS VON MWB 70
TABELLE 13: DATEN DES TESTMOTORS VON S.E.A.D.....74
TABELLE 14: VERGLEICHENDE DARSTELLUNG DER TESTLÄUFE 75
TABELLE 15: ABGASWERTE BEI DER NUTZUNG VON PYROLYSEÖL [27] 84
TABELLE 16: ELEMENTARANALYSE FLÜSSIGER ENERGIETRÄGER.....85
TABELLE 17: EMISSIONSGRENZWERTE FÜR ANLAGEN DER NUMMER 1.4 90

13 Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1 PRIMÄRENERGIEVERBRAUCH UND ERNEUERBARE ENERGIEN IN DEUTSCHLAND 2005 (WIRKUNGSGRADMETHODE), QUELLEN: AGEE-STAT; AG ENERGIEBILANZEN 17
ABBILDUNG 2: POTENTIAL BIOGENER TREIB- UND KRAFTSTOFFE IN DEUTSCHLAND, QUELLE: DLR 20
ABBILDUNG 3: TYPISCHE AUSBEUTEN AUS DER ABLATIVEN FLASH-PYROLYSE VON HOLZ [4] 22
ABBILDUNG 4: ZUSAMMENSETZUNG DES NICHTKONDENSIERBAREN GASANTEILES (LABORPYROLYSEANLAGE PYTEC) 25
ABBILDUNG 5: WIRKPRINZIP DER ABLATIVEN PYROLYSE (LÉDÉ ET AL. 1985,1986) 30
ABBILDUNG 6: EINFLUSS DES STABDURCHMESSERS (LÉDÉ ET AL., FUEL 1985) 31
ABBILDUNG 7: EINFLUSS DES ANPRESSDRUCKES (LÉDÉ ET AL., FUEL 1985) 32
ABBILDUNG 8: EINFLUSS DER TEMPERATUR (LÉDÉ ET AL., FUEL 1985) 33
ABBILDUNG 9: GRUNDFLIEßBILD 41
ABBILDUNG 10: PYTEC LABORANLAGE FÜR DIE ABLATIVE FLASH-PYROLYSE [20] 1 PNEUMATIKZYLINDER, 2 ZUFÜHRSTÄBE, 3 ZUFÜHRKANÄLE, 4 MAGAZIN, 5 HEIZPLATTE, 6 ANTRIEBS- UND GETRIEBEEINHEIT 42
ABBILDUNG 11: HEIZPLATTE DER PYTEC-LABORANLAGE [20] 5 HEIZPLATTE, 7 METALLSTEMPEL, 8 WÄRMEISOLATIONSPLATTE 43
ABBILDUNG 12: REAKTOR DER PYTEC-LABORANLAGE [20] 3 MOTOR- UND GETRIEBEEINHEIT, 9 REAKTORGEHÄUSE, 10 AUFFANGBEHÄLTER B, 11 AUFFANGBEHÄLTER A, 12 ABLEITUNG 44
ABBILDUNG 13: PYTEC LABORREAKTOR (OHNE SIDE-SLIP) 45
ABBILDUNG 14: ÜBERBLICK ÜBER WICHTIGE PARAMETER DER ABLATIVEN FLASHPYROLYSE 46
ABBILDUNG 15: MUNDSTÜCK MIT METALLRAHMEN 50
ABBILDUNG 16: TOTRAUM ZUR REALISIERUNG DES KOHLEAUSTRAGS AUS DEM REAKTOR 51
ABBILDUNG 17: REAKTOR OHNE ISOLIERMATERIAL 51
ABBILDUNG 18: REAKTOR MIT ISOLIERMATERIAL ZUR MINIMIERUNG DES REAKTIONSRAUMES 51
ABBILDUNG 19: BEREICH DER WÄRMEABNAHME AUF DER HEIZPLATTE, ERKENNBAR DURCH DIE SCHLEIFSPUREN DES HOLZES 52
ABBILDUNG 20: ZYKLONEINGANG SAUBER
ABBILDUNG 21: ZUGESETZT MIT KOHLESTAUB 55
ABBILDUNG 22: AUSGANG DES ÜBERSTRÖMROHRES, ZUGESETZT MIT KONDENSIERTEM PRIMÄRGAS 56
ABBILDUNG 23: OFFENE BODENKOLONNE, ZUGEWACHSEN MIT PYROLYSEKOKS 57
ABBILDUNG 24: VERFAHRENSSCHRITTE ZUR STROMERZEUGUNG AUS HOLZ 63
ABBILDUNG 25: 3-D-ANSICHT DER PILOTANLAGE ZUR ABLATIVEN FLASH-PYROLYSE 64
ABBILDUNG 26: 3-D-ANSICHT EINSCHUBMODELL 67
ABBILDUNG 27: PRESSKUCHEN AM EINSCHUBMODELL 68
ABBILDUNG 28: PYROLYSATOR BEI FERTIGSTELLUNG DER MONTAGE 69
ABBILDUNG 29 DIESELAGGREGAT DER PILOTANLAGE 76
ABBILDUNG 30: QUANTITATIVE ZUSAMMENSETZUNG DES ABGASSTROMS 81

14 Literaturverzeichnis

[1] Leitfaden Bioenergie, Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen, BMVEL, FNR, Gülzow

[2] Dr. Dietrich Meier, Dr. Steffen Wehlte, Dr. Christoph Simon, Torsten Ollesch: Stoffliche Verwertung von nicht naturbelassenen Holzresten durch Pyrolyse in der Wirbelschicht, DBU-Abschlußbericht zum Projekt 03 63 1, Hamburg, 1998

[3] A. Oasmaa, C. Peacoke: A guide to physical property characterisation of biomass-derived fast pyrolysis liquids. Espoo 2001. Technical Research Centre of Finland, VTT Publications 450

[4] Toft, A.J.: Ph. D. thesis, Aston University, Birmingham 1996

[5] D. Meier, H. Klaubert: Untersuchung der Wirbelschichtpyrolyse von Holzpartikeln, BFH - Institut für Holzchemie und chemische Technologie des Holzes, Arbeitsbericht 2002/1

[6] D. Chiaramonti, G. Tondi: Stationary Applications of Liquid Biofuels, Final Report, PTA contract NNE5-PTA-2002-006, lot 36, www.etaflorence.it

[7] D. Chiaramontia, M. Boninia, E. Fratini, G. Tondi, K. Gartner, A.V. Bridgwater, H.P. Grimm, I. Soldaini , A. Webster, P. Baglionia: Development of emulsions from biomass pyrolysis liquid and diesel and their use in engines—Part 2: tests in diesel engines; Biomass and Bioenergy 25 (2003) 101 – 111

[8] A. Oasmaa, C. Peacoke, S. Gust, D, Meier, R. McLellan: Norms and Standards for Pyrolysis Liquids. End-User Requirements and Specifications, Energy and Fuels 2005, 19, 2155 – 2163

[9] E. Henrich, E. Dinjus, D. Meier: Flugstromvergasung von flüssigen Pyrolyseprodukten bei hohem Druck, DGMK-Tagung: Energetische Nutzung von Biomassen, Velen 22. – 24. April 2002

[10] D. Meier: Stoffliche Verwertung von Pyrolyseflüssigkeiten aus Lignocellulosen; Teilvorhaben 1: Wissenschaftlich-technische Begleitung, BFH - Institut für Holzchemie und chemische Technologie des Holzes, Arbeitsbericht 2003/1

[11] Scott, D.S.; Piskorz, J.; Radlein, D.: Production of Levoglucosan as an Industrial Chemical. In: Witczak, Z.J. (Hrsg.) Levoglucosenone and Levoglucosans. Chemistry and Applications. Proceedings of the Symposium on Levoglucosenone and Levoglucosans, Washington, August 26,

1992. Frontiers in Biomedicine and Biotechnology, Vol. 2, ATL Press, Mount Prospect/IL/USA, 179-188.

[12] D. Meier: Flash-Pyrolyse zur Verflüssigung von Biomasse – Stand der Technik, DGMK Tagungsbericht 2002-2 "Energetische Nutzung von Biomasse", Velen/Westf. 22.-24.04.2002. Hamburg: DGMK Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e.V. 2002, S. 45-52.

[13] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Erneuerbare Energien in Zahlen, nationale und internationale Entwicklung, Stand: Mai 2006; Bindesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) Referat Öffentlichkeitsarbeit, 11055 Berlin

[14] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie: Energieversorgung für Deutschland, Statusbericht für den Energiegipfel am 3. April 2006, Berlin, März 2006

[15] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Erneuerbare Energien – Innovationen für die Zukunft, Stand: April 2006, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) Referat Öffentlichkeitsarbeit, 11055 Berlin

[16] DLR, IFEU: Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland, Forschungsvorhaben im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit FKZ 901 41 803, Kurzfassung, Stuttgard, Heidelberg, Wuppertal, Februar 2004, http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/nutzung_ee.pdf

[17] Meier, D.: Aktuelle Entwicklungen auf dem Gebiet der Flyshpyrolyse zur Verflüssigung von Biomasse, Vortrag, VDI Bezirksgruppe Lüneburg, 11. 05. 2006

[18] J. Lédé, (2003): Comparison of contact and radiant ablative pyrolysis of biomass. Journal of Analytical ; Applied Pyrolysis. Elsevier, Oxford, S. 601-618

[19] D. Meier, S. Schöll, H. Klaubert (2004): Patentanmeldung: Verfahren und Vorrichtung zur Pyrolyse von Biomasse. WO 2004/076591 A1 vom 10.09.2004

[20] A. Kowakowsky: Entwicklung und Konstruktion einer Zuführeinheit für eine Flash-Pyrolyse-Einheit, Diplomarbeit Fachhochschule Nordostniedersachsen Fachbereich Automatisierungstechnik, SS 2003

[21] Peter Paul Wulzinger: Dissertation zur Erreichung des Doktorgrades, Universität Hamburg, Hamburg 1999

[22] M.Neumann, N. Erhard, C. K. Gaping: Studienprojekt Nachwachsende Rohstoffe/regenerative Energien Biomasseumwandlung, Abschlussbericht, HAW Hamburg SS 2004

[23] Prof. Dr.-Ing. R. Behrens, Dipl.-Ing. O. Schönig: Betrieb eines Dieselmotors mit Pyrolyseöl, Abschlußbericht des Untersuchungsauftrages, Institut für Wärme-kraft- und Arbeitsmaschinen, Hochschule Bremerhaven , 2004

[24] Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundesimmissionschutzgesetzes in der Fassung der Bekanntmachung vom 14. März 1997 (BGBl. I S. 504), zuletzt geändert durch Artikel 22a Geräte- und Produktsicherheitsneuordnungs G v. 6.1.2004 (BGBl. I S. 2), Deutscher Taschenbuch Verlag, München 2005, 7. Auflage

[25] Klaus Görner, Kurt Hübner (Hrsg.): Gasreinigung und Luftreinhaltung; Springer-Verlag, Berlin 2002

[26] Bundesforschungsanstalt für Holzchemie: Gasanalyse aus dem Technikumsversuch zur ablativen Flashpyrolyse AP 44

[27] SEAD Ges. zur Wartung von Dieselaggregaten und Anlagen mbH: Versuch zur Verbrennung von Pyrolyseöl in 12 Zyl.-Viertakt-Dieselmotor MERCEDES Typ OM444LA vom 16.12.04

[28] Meier, D.: Arbeitsbericht des Institut für Holzchemie und chemische Technologie des Holzes, Stoffliche Verwertung von Pyrolyseflüssigkeiten aus Lignocellulosen, Teilvorhaben 1: Wissenschaftlich-technische Begleitung; Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft und die Ordinariate für Holzbiologie, Holztechnologie und Weltforstwirtschaft der Universität Hamburg, Hamburg 2003