

1 Einleitung und Zielsetzung

„Man nehme zum Beispiel, als die erste größere Veränderung in dem überkommenen Bild, die kritische Verletzlichkeit der Natur durch die technische Intervention des Menschen — eine Verletzlichkeit, die nicht vermutet war, bevor sie sich in schon angerichtetem Schaden zu erkennen gab. [...] Sie bringt durch die Wirkungen an den Tag, daß die Natur menschlichen Handelns sich de facto geändert hat, und daß ein Gegenstand von gänzlich neuer Ordnung, nicht weniger als die gesamte Biosphäre des Planeten, dem hinzugefügt worden ist, wofür wir verantwortlich sein müssen, weil wir Macht darüber haben.“¹

1.1 Hintergrund

Die Erkenntnis Jonas' zur „Verletzlichkeit der Natur“ erfolgt vor dem Hintergrund des Erkenntnisfortschritts der Wissenschaft hinsichtlich des Ökosystems Erde und des wachsenden Umweltbewusstseins der Bevölkerung. Damit einher geht eine internationale Diskussion von Wissenschaft und Politik zur Problematik der Umweltveränderung, welche zunächst insbesondere vor dem Hintergrund des Schutzes natürlicher Ressourcen stattfindet.

Seit den späten sechziger Jahren haben ökologische Fragen zunehmend die nationale und internationale politische und wissenschaftliche Diskussion beeinflusst. Im September 1968 fand in Paris die sogenannte „Biosphären-Konferenz“ internationaler Experten statt. Sie markierte den Beginn verstärkter internationaler Anerkennung des Zusammenhanges zwischen Ökonomie und Ökologie [95]. Im Jahr 1972 folgte die „Conference on the Human Environment“² der Vereinten Nationen in Stockholm [95, 29]. Als Ergebnis der ersten Weltklimakonferenz in Genf 1979 warnten Experten vor einer Beeinflussung des Klimas durch den Kohlendioxidausstoß der menschlichen Gesellschaft [95].

Vor dem Hintergrund eines möglichen Klimawandels und der Abhängigkeit von dem Import von Energieträgern werden in Europa die Möglichkeiten des Einsatzes heimischer und regenerativer Energieträger für die Deckung des Bedarfs an Primärenergie diskutiert. Trotz der unterschiedlichen Rahmenbedingungen in den Staaten der Europäischen Gemeinschaft kommt der „Biomasse“ für die mittelfristige Zukunft eine zentrale Bedeutung zu [113, 114, 118, 119].

In dieser Diskussion wird die Einsatzmöglichkeit sowohl von biogenen industriellen Reststoffen, biogenen Abfällen und Biomasse aus der Landschaftspflege als auch der gezielte Anbau von Energiepflanzen zur energetischen Nutzung in der Kraft- und Brennstoffversorgung sowie zur Stromerzeugung erwogen. Die ökologische und ethische Diskussion um

¹ Hans JONAS: „Das Prinzip Verantwortung“, erstes Kapitel Abschnitt III-1. Die Verletzlichkeit der Natur S. 26 f [77]

² Der Mensch und seine natürliche Umwelt

den Anbau von Energiepflanzen³ im Verhältnis zur Nahrungs- und Futtermittelproduktion sowie die Möglichkeit der Verwendung von Nahrungs- oder Futtermitteln zur Energieerzeugung ist eng mit den technischen Möglichkeiten zur energetischen Umwandlung von Biomasse verbunden, muss aber an anderer Stelle geführt werden.

Innerhalb von 10 Jahren bis zum Jahr 2010 verzehnfachte sich der Anteil an elektrischer Energie, der aus Biomasse erzeugt wird [3]. WEIDELE et al. berichten, z.T. anhand genehmigter Planungen, über eine Verdreifachung der installierten Leistung an Kraft- und Heizkraftwerken auf Basis fester Biobrennstoffe von 1999 bis 2004 [164]. Während im Jahr 2000 noch mehr als 50 % der aus Biomasse erzeugten elektrischen Energie aus Klär- und insbesondere Deponiegas stammte [66], machten diese 2010 nur noch weniger als 20 % aus [112]. Biogas und feste Biobrennstoffe stellen heute mit über 75 % den größten Anteil der Elektrizitätserzeugung aus Biomasse [112]. WEIDELE et al. sehen dabei für die Zukunft bei der festen Biomasse die größeren technisch nutzbaren Reserven [164].

Grundsätzlich kommen für die energetische Nutzung von Biomasse die direkte thermische Nutzung nach mechanischer Aufbereitung und die biochemische oder thermochemische Veredlung in Frage. Zum einen ist die direkte thermische Nutzung für viele als Abfallstoffe anfallende Biomasse nicht sinnvoll, zum anderen stellt sie die exergetisch mit den meisten Verlusten behaftete Variante dar. Dennoch ist diese Anwendung bei hohem Heizenergiebedarf und geeignetem Festbrennstoff ein sinnvolles und verbreitetes Verfahren und zudem technisch ausgereift.

Die biochemische Umwandlung stellt für viele landwirtschaftliche Reststoffe mit hohem Wassergehalt eine einfache, ökologische und wirtschaftliche Nutzung dar, führt – aufgrund des nach dem Stand der Technik nicht umsetzbaren Lignins – allerdings zu einem Nebenprodukt mit erheblichem Masseanteil bezogen auf den Feststoffgehalt des Ausgangsstoffes. Die Nutzung des so gewonnenen „Biogases“ ist Stand der Technik.

Flüssige, durch Pressen gewonnene oder als Abfallprodukt anfallende Biomasse wird durch chemische Veredlung in flüssige Energieträger umgewandelt, welche in der Regel als Kraftstoff genutzt werden.

Insbesondere für die energetische Nutzung der aus den vorstehenden Verfahren als Rückstand verbleibenden sowie in diesen Verfahren nicht nutzbaren Biomasse bieten sich die thermochemischen Verfahren, insbesondere die thermochemische Vergasung an. Nachdem diese zur Zeit des zweiten Weltkrieges in Form des Gasgenerators eine erste Renaissance erlebte, und zwar insbesondere zur mobilen Gaserzeugung für den Antrieb von Fahrzeugen, erlebt sie heutzutage eine zweite Renaissance vor dem Hintergrund CO₂-neutraler Erzeugung elektrischer Energie.

³ Der ökologische Nutzen des Anbaus von Ölsaaten zur Substitution von Mineralöl wird kontrovers diskutiert, hierzu siehe z.B. [135, 116].

1.2 Motivation

Holz, andere pflanzliche Biomasse und biogene Reststoffe stellen einen dezentral anfallenden Brennstoff dar, der aufgrund des verteilten Vorkommens und der im Vergleich zu fossilen festen und flüssigen Energieträgern geringen Energiedichte ohne allzu große Transportwege genutzt werden sollte. Auch könnte die energetische Nutzung dieser Stoffe zur Diversifizierung in der Land- und Forstwirtschaft oder zur Verminderung von Abfall in der Holz- oder lebensmittelverarbeitenden Industrie beitragen und somit die wirtschaftliche Basis dieser Betriebe stärken. Allerdings zeigt sich bei der zunehmenden Verbreitung der biogenen Vergärung, dass dies weitgehend nicht der Fall ist, sondern Brennstoff für Biogasanlagen großflächig und in bevorzugten Lagen angebaut wird und eine Verdrängung der landwirtschaftlichen Flächen für die Produktion von Lebensmitteln erfolgt. Dieser Effekt ist allerdings nicht systemimmanent, sondern ein Ergebnis der Förderkulisse durch die Politik.

In Bezug auf die Verbrennung und Vergärung hat sich in den letzten Jahren eine dynamische Entwicklung eingestellt, die allerdings bei der Vergasung fester Brennstoffe ausgeblieben ist. Grund dafür ist eine fehlende technische Entwicklungsreife der Vergasungsanlagen für biogene Festbrennstoffe.

Der Arbeit liegt die Motivation zugrunde, einen Beitrag zum Verständnis der Vorgänge in indirekt beheizten Kleinvergäsern und zur Entwicklung von einfachen Kleinvergäsern zu liefern.

1.3 Zielsetzung und Methodik der Arbeit

Das Augenmerk dieser Arbeit ist auf die feste Biomasse gerichtet. Feste Bioenergieträger werden fast ausschließlich thermisch genutzt, jedoch wird in zunehmendem Umfang auch Strom erzeugt [117]. Dabei stellen die wirtschaftlich notwendige Mindestgröße und die damit verbundenen logistischen Probleme sowie neuerdings die Verknappung zur Verbrennung gut geeigneten Holzes das hauptsächliche Hindernis dar [71]. Eine breitere Anwendbarkeit verspricht die thermochemische Veredlung durch Pyrolyse oder Vergasung. Die Pyrolyse liefert dabei immer ein im Wesentlichen aus Kohlenstoff bestehendes festes Produkt sowie ein chemisch komplexes Gemisch flüssiger und gasförmiger Stoffe. Für diese Gemische bestehen aufgrund ihrer toxischen und karzinogenen Wirkung in Vorschriften festgelegte Regeln für ihre Handhabung. Zielsetzung der Vergasung ist es, die Biomasse möglichst vollständig in ein Gas umzuwandeln. Allerdings wird die unvollständige Vergasung auch eingesetzt, um im Gegensatz zur Pyrolyse nur noch einen Feststoff und ein Gasmisch als Produkte zu erhalten [86].

In diesem Zusammenhang verfolgt die vorliegende Arbeit das Ziel, ein Verfahren zur Vergasung von Biomasse zu entwickeln und experimentell zu untersuchen, welches die Nutzungsmöglichkeiten fester Biomasse zur Stromerzeugung erweitert. Insbesondere soll

die Anwendbarkeit der Vergasung auf feuchte Biomasse ausgedehnt werden, für die in der Form keine technische Lösung bekannt ist. Dazu wird ein Festbettreaktor mit äußerer Wärmezufuhr eines Durchsatzes in der Größenordnung ein Kilogramm zur Vergasung von Biomasse mit Wasserdampf aufgebaut und experimentell untersucht. Arbeiten zur indirekt beheizten Vergasung im Festbett sind nur sehr wenige vorhanden, und eine Beurteilung des Prozesses anhand der verfügbaren Datenbasis ist nicht möglich.

Zur Aufstellung von Bilanzen an Masse und Energie sollen mittels geeigneter Auswerteverfahren die experimentell gewonnenen Daten und die brennstofftechnischen Analysen des jeweiligen Ausgangsstoffes und der Produkte zur Beurteilung des Verfahrens und der wesentlichen Einflussgrößen herangezogen werden. Die experimentellen Daten sollen zur Validierung eines Modells zur Auslegung indirekt beheizter Festbettreaktoren zur Vergasung von Biomasse mit Wasserdampf dienen. Diese Zielsetzung bedingt einen experimentellen Schwerpunkt der Arbeit. Ergänzend zu dem experimentellen Teil der Arbeit und zur Anbindung an die zugrundeliegende Theorie soll ein weitestgehend analytisches Modell für den stationären Betriebszustand entwickelt werden, so dass eine Beurteilung des Prozesses und eine Übertragung der experimentellen Ergebnisse auf nicht untersuchte Betriebszustände möglich wird.

Im Rahmen des von der „Deutschen Bundesstiftung Umwelt“ geförderten Projektes „Indirekt beheizter Biomassevergaser zur Kraft-Wärme-Kopplung“ wird eine dem untersuchten Verfahren entsprechende Technikumsanlage zur Vergasung von feuchtem Holz mit eingebrachtem Wasser als Vergasungsmittel entworfen. Dieser Entwurf verfolgt den Ansatz, bisher energetisch nicht nutzbares Holz über den Pfad der Vergasung zur Stromerzeugung bereitzustellen [86].

2 Definition der verwendeten Begriffe

„*Biomasse: Gesamtheit aller lebenden, toten und zersetzten Organismen eines Lebensraums (auch der gesamten Erde), einschließlich der von ihnen produzierten organischen Substanzen.* [...]“ [165]

In dem Bereich des bearbeiteten Themengebietes werden Stoffe behandelt, die sich nicht durch chemisch exakte Zusammensetzung definieren lassen und für die häufig keine eindeutige Nomenklatur existiert. Einerseits werden eine Vielzahl von Begriffen mit teils synonymen, teils geringfügig unterschiedlicher oder missverständlicher Bedeutung verwendet; andererseits wird mit denselben Begriffen unter Umständen eine unterschiedliche Bedeutung verstanden.

Die Gründe hierfür sind vielfältig. Sie können durch historisch gewachsene Begriffe und missverständliche Übersetzungen genauso verursacht worden sein wie durch Abgrenzungsprobleme aufgrund verschiedener möglicher Klassifizierungsmerkmale. Des Weiteren treten auch anwendungsbezogene Definitionsunterschiede auf.

Der Begriff *Biomasse* im Rahmen der energetischen Nutzung trägt evidenterweise eine andere Bedeutung als die oben genannte aus dem *Brockhaus*. Gerade hier zeigt sich, dass die Begriffsbedeutung stark mit der Nutzung der durch den Begriff beschriebenen Sache zusammenhängt. Während die enzyklopädische Definition eine möglichst allgemeine Beschreibung zum Ziel hat, verfolgt die politische Definition vornehmlich das Ziel einer rechtlich eindeutigen Abgrenzung.

2.1 Definition allgemeiner Begriffe

Zur energetischen Nutzung wird der Begriff *Biomasse* synonym für *biogene Brennstoffe* verwendet. Gegenüber der eingangs angeführten allgemeinen Definition von *Biomasse* aus dem Brockhaus erfolgt die Definition *biogener Brennstoffe* durch Abgrenzung von der lebenden Zoomasse und zum anderen von dem fossilen Sekundärprodukt Torf. Problematisch stellt sich die Abgrenzung von Mischstoffen, wie z.B. Hausmüll oder Klärschlamm, sowie von denaturierten Produkten wie Industrieabfällen oder chemisch behandelten Hölzern dar.

Im Rahmen der Biomasseverordnung wird der Begriff *anerkannte Biomasse* verwendet. „Biomasse im Sinne dieser Verordnung sind Energieträger aus Phyto- und Zoomasse. Hierzu gehören auch aus Phyto- und Zoomasse resultierende Folge- und Nebenprodukte, Rückstände und Abfälle, deren Energiegehalt aus Phyto- und Zoomasse stammt.“⁴

Des Weiteren werden biogene Brennstoffe häufig getrennt nach dem Aggregatzustand definiert, z.B. „Biogene Festbrennstoffe sind rezente Brennstoffe organischer Herkunft, die zum Zeitpunkt ihrer energetischen Nutzung in fester Form vorliegen“ [43]. Da in

⁴ Vgl. BiomasseV (idF v. 21.6.2001) §2 Abs. I

der vorliegenden Arbeit ausschließlich solche *biogenen Festbrennstoffe* zur Anwendung kommen, wird der allgemeine Begriff *Biomasse* synonym für diese verwendet.

Die energetisch genutzte Biomasse wird von den nachwachsenden Rohstoffen durch ihre Nutzung abgegrenzt. Nachwachsende Rohstoffe sind land- und forstwirtschaftlich erzeugte Produkte, die einer Verwendung im Nichtnahrungsbereich zugeführt werden.

Für die betrachtete Problematik der Vergasung von Biomasse sind verschiedene reaktionstechnische Abläufe, welche teilweise parallel zueinander ablaufen, von Bedeutung. Diese werden durch die Begriffe der Pyrolyse, Sekundärreaktionen, Vergasung und Crackreaktionen bezeichnet.

Als *Pyrolyse* wird die thermochemische Degradation eines organischen Stoffes in inerter Atmosphäre bezeichnet, wobei ein fester Rückstand und ein bei Prozesstemperatur gasförmiger Teil flüchtiger Verbindungen entsteht, weshalb die Pyrolyse auch, insbesondere in der technischen Anwendung, als *Entgasung* bezeichnet wird⁵. Real betrachtet lässt sich technisch die Pyrolyse allerdings nicht vollständig inert durchführen, da durch die Pyrolyse selbst eine reaktive Atmosphäre insbesondere durch Pyrolysewasser gebildet wird. Somit wird in der vorliegenden Arbeit auch dann von Pyrolyse gesprochen, wenn Reaktionen des Feststoffs mit der Atmosphäre vernachlässigbar sind. Dieses ist unter Luftabschluss in der Regel gegeben. Die Produkte der Pyrolyse sind fest, flüssig und gasförmig. Je nach gewünschtem Produkt sind synonyme Begriffe für die Pyrolyse gebräuchlich. Die Pyrolyse wird als Entgasung beim Zielprodukt Gas, als Schwelung beim Zielprodukt Flüssigkeit und als Verkohlung beim Zielprodukt Feststoff bezeichnet. Mit dieser Zielsetzung stellt die Pyrolyse die thermochemische Aufwertung eines kohlenstoffhaltigen Ausgangsstoffes dar. Höherwertig soll hierbei als „besser im Sinne der Nutzbarkeit für eine gewünschte technische Anwendung“ verstanden werden⁶. Historisch gesehen handelt es sich dabei um die Herstellung von Holzkohle in Meilern und später die Herstellung von Koks in Retorten.

Bei der Pyrolyse entstehen Primärprodukte, welche mit dem Ausgangsstoff, miteinander und mit der wasserdampfhaltigen Gasphase reagieren. Diese Reaktionen werden als Sekundärreaktionen bezeichnet. Sie umfassen die homogenen und heterogenen Reaktionen der Pyrolyseprodukte untereinander. Reine unimolekulare Spaltungsreaktionen in der Gasphase werden auch als Crack-Reaktionen bezeichnet. In der vorliegenden Arbeit werden diese auch unter den Überbegriff der Sekundärreaktionen gefasst.

Die gasförmigen Produkte der Pyrolyse werden historisch als „Schwelgas“, „Holzgas“, „Kohlegas“ und „Leuchtgas“⁷ bezeichnet. Für die festen Produkte wird hinsichtlich des

⁵ Vgl. MEUNIER: Die Brennstoffe. **In:** [104]

⁶ Vgl. MEUNIER: Die oxydative Umwandlung der Brennstoffe. **In:** [104]

⁷ Historisch aus dem Englischen durch die Nutzung des *coal gas* zum Zweck der Beleuchtung durch MURDOCK und die zur Aufwertung damit verbundene Beimischung von Wasserdampf zu dem heißen Gas zur Nutzung als *illuminating gas*

Rohstoffs in Holzkohle, Schwelkoks, Halbkoks und Koks unterschieden⁸. Die bei Standardbedingungen flüssigen Produkte weisen stark unterschiedliche Zusammensetzungen und Eigenschaften auf, sodass von Teer, Öl, Kondensat, Wasser und weiteren Begriffen, z.T. mit zusätzlicher Unterscheidung nach dem Ausgangsstoff, gesprochen wird. Hier werden ausschließlich die Begriffe Pyrolysat für das feste Produkt, Pyrolysegas für das gasförmige und Kondensat für die Summe der flüssigen Produkte, welche sich bei detaillierter Betrachtung zu Teer, Pyrolyseöl und wässriger Phase unterscheiden lassen, verwendet.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sind die Produkte der Pyrolyse Zwischenprodukte. Das Augenmerk liegt auf den Produkten der Vergasung. Die *Vergasung* bezeichnet die unterstöchiometrische thermochemische Umsetzung in heterogenen Reaktionen eines oder mehrerer gasförmiger Vergasungsmittel mit dem Kohlenstoff des Pyrolystats und der kondensierenden Phasen. Der feste Rückstand der Vergasung, der aus einem nicht vergastem Rest des Pyrolystats und dem nicht vergasbaren Teil der Asche besteht, wird als Vergasungsrückstand bezeichnet. Flüssige Produkte bei Standardtemperatur treten bei der Vergasung nicht auf. Sie stellen Rückstände der Pyrolyse dar, die in den parallel ablaufenden Sekundär- und Crackreaktionen nicht umgesetzt bzw. zersetzt werden und werden daher wie bei der Pyrolyse als Kondensat bezeichnet. Die gasförmigen Produkte werden als Produktgas bezeichnet. Aufgrund der Entwicklungsgeschichte der Vergaser, welche auch als Gasgeneratoren oder Gaserzeuger bezeichnet werden, existiert eine Fülle von Begriffen für das erzeugte Gas, welche durch die Herstellungsmethode gekennzeichnet sind und sich nur sehr unscharf über die Qualität des Gases abgrenzen lassen.

Für das in autothermen Vergasern erzeugte Gas findet im Deutschen allgemein der Begriff „Vergasungsgas“, im Englischen „producer gas“ Anwendung. Es existieren unterschiedliche begriffliche Unterscheidungen, die sich anhand der eingesetzten Vergasungsmittel, aufgrund der Gaseigenschaften und aus der Bauart oder Betriebsweise des Gaserzeugers ableiten.

Der Begriff „Generatorgas“⁹ wird für das Gas verwendet, das durch die autotherme Vergasung mit Luft, evtl. unter Zugabe von Wasserdampf als zusätzlichem Vergasungsmittel, erzeugt wird. Entfällt die Beimischung von Wasserdampf, wird auch von „Luftgas“ gesprochen. Wird im Wesentlichen Wasserdampf als Vergasungsmittel eingesetzt, wird das Gas als „Wassergas“ bezeichnet. In diesem Zusammenhang wird anstelle des Gasgenerators bzw. -erzeugers auch vom Wassergasgenerator bzw. -erzeuger gesprochen. Ein technischer Vergaser mag dabei so betrieben werden, dass dieser periodisch exotherm und anschließend endotherm betrieben wird, siehe LOWE [38]. Der exotherme Betrieb erfolgt i.d.R. durch eine Vergasung mit Luft, das sogenannte Heißblasen, und der endotherme Betrieb mit Wasserdampf, das sogenannte Gasen.

Abhängig von dem Ausgangsstoff wird im Fall des aus Holz oder Holzkohle erzeugten Gases der Begriff „Holzgas“ verwendet. Im Zusammenhang mit der gasmotorischen Nutzung

⁸ Vgl. MEUNIER: Die Brennstoffe. **In:** [104]

⁹ Vgl. Bezeichnung des Vergasers als Gasgenerator bzw. aus dem Englischen *generator gas*

wird von „Sauggas“ gesprochen, falls das Gas durch einen im Unterdruck eines nachgeschaltet saugenden Gasmotors betriebenen Vergasers erzeugt wird. Des Weiteren wird das Vergasungsgas auch nach dem Namen des Gaserzeugers bezeichnet, was heutzutage eher vor dem Hintergrund eines Markennames zu verstehen ist.

Aufgrund des geringen Brennwertes des Gases wird das in autothermen Vergasern erzeugte Gas auch als „Schwachgas“ bezeichnet, da dieses die Definition der Brenngasgruppe I, welche den geringsten Brennwert kleiner 10 MJ/m^3 aufweist, nach DIN 1340 erfüllt. Dieses trifft in der Regel nicht auf das sogenannte Wassergas zu. Entsprechend der Anwendung wird das Gas auch als „Kraftgas“¹⁰, „Heizgas“ oder als „Leuchtgas“¹¹, sofern durch Karburierung dem Gas ein Anteil höherer Kohlenwasserstoffe zur Verbesserung der Leuchtkraft beigemischt wird, bezeichnet. Bei allotherm hergestellten Gasen handelt es sich in aller Regel um das sogenannte Wassergas. Der Begriff „Synthesegas“ wird angewandt, wenn das Gas durch Mischen von „Luftgas“ und „Wassergas“ auf ein Verhältnis von Wasserstoff zu Kohlenmonoxid von 2 zu 1 eingestellt wird. Kohlendioxid wird dabei durch Waschen entfernt. Das „Synthesegas“ dient der Methanolsynthese¹².

Ungeachtet der Vielzahl der verwendeten Begriffe und Unterschiede des Gases in qualitativer Hinsicht findet für das im Rahmen der Untersuchung erzeugte Gas der Oberbegriff *Produktgas* Anwendung, welcher gegebenenfalls durch weitere Merkmale charakterisiert wird.

Zwei Begriffspaare zur Prozessbeschreibung, die nicht einheitlich verwendet werden, sind autotherm/allotherm und indirekt/direkt beheizt.

Als *autotherm*¹³ wird ein Prozess bezeichnet, der die zum Betrieb notwendige thermische Energie ohne eine zusätzliche Energiezufuhr aufbringt. Als *allotherm*¹⁴ wird dementsprechend ein Prozess, der eine zusätzliche Energiezufuhr benötigt, bezeichnet (vgl. SCHMIDT [144]). Bei komplexeren Prozessen können Teilprozesse auto- oder allotherm sein, ohne dass dieses für den gesamten Prozess gelten muss. Die Klassifizierung hinsichtlich dieses Merkmals ist von der Wahl der Systemgrenze abhängig¹⁵.

Als *indirekt* beheizt wird ein Prozess bezeichnet, bei dem die Wärmezufuhr durch die Wand des Prozessraumes bzw. eines Wärmeübertragers erfolgt. Die Stoffströme eines Energieträgermediums und des Einsatzstoffes sind räumlich getrennt. Im Gegensatz dazu wird ein Prozess als *direkt* beheizt bezeichnet, wenn die thermische Energie im Prozessraum erzeugt oder mit einem Energieträger in den Prozessraum eingebracht wird. Diesen letzten Aspekt unter die direkte Beheizung zu fassen, mag strittig sein, erscheint aber aus verfahrenstechnischer Sicht sinnvoll. In thermischer Hinsicht ist der indirekt beheizte Prozess durch den Wärmedurchgang limitiert, während der direkt beheizte Prozess

¹⁰ Im Falle der gasmotorischen Nutzung

¹¹ Siehe auch Pyrolysegase

¹² Vgl. RAMBUSH [127], SCHLÄPFER [142], DOLCH [38] und MEUNIER: Verfahren. **In:** [104]

¹³ auto = selbst, aus dem Griechischen

¹⁴ allo = anders, aus dem Griechischen

¹⁵ Unberücksichtigt bleibt die Zuführung elektrischer oder mechanischer Energie, z.B. für Antriebe.

durch den Wärmeübergang limitiert ist. Dementsprechend ist die gewählte Zuordnung konsistent.

Insbesondere im Englischen wird der Begriff der *aufsteigenden Vergasung*¹⁶ synonym mit der *Gegenstromvergasung* und dementsprechend der *absteigenden Vergasung*¹⁷ synonym mit der Gleichstromvergasung verwendet. Diese Synonyme sind irreführend, da die absolute räumliche Orientierung mit einer relativen räumlichen Orientierung gleichgesetzt wird, was die Grundannahme, die Bewegung des Feststoffs erfolge in Richtung des Gravitationsfeldes der Erde, voraussetzt. Dieses ist nicht zwingend notwendig, was die Entwicklung von aufsteigenden Gleichstromvergasern¹⁸ nach MICHEL-KIM [105] und die Entwicklung am Solar Energy Research Institute (SERI) zeigt [129]. Es wird daher ausschließlich die relative Orientierung von Gas- und Feststoffstrom zur Charakterisierung des Vergasungsprozesses verwendet. Dieses ist sinnvoll, da die Eigenschaften des Prozesses davon abhängen. Eine Abhängigkeit von der absoluten Orientierung wurde bisher weder gezeigt noch erscheint sie plausibel.

Ein weiteres Missverständnis kann im Zusammenhang mit den Begriffen Festbett¹⁹ und Wanderbett/Fließbett²⁰ auftreten. Naheliegenderweise wird mit dem Begriff des Festbettes ein Batchprozess verbunden, während mit dem Wander- oder Fließbett ein kontinuierlicher Prozess verbunden wird. Der in dieser Arbeit zu diskutierende Prozess ist in diese Charakteristik nur schwer einzuordnen. Der Begriff des Wanderbettes ist durch die automatische (Wanderbett-)Rostfeuerung belegt. Nach Auffassung des Autors bedingt der Begriff des Fließbettes eine wahrnehmbare Bettgeschwindigkeit, welche zu der Ausbildung einer kontinuierlichen Bettbewegung führt (vgl. SCHMIDT [144]). Mit der Bettbewegung sind sowohl Mischungsvorgänge als auch Einflüsse auf die Wärme- und Stoffübertragung verbunden, die charakteristische Eigenschaften eines Fließbettes darstellen. Diese Charakterisierung, die mit dem Begriffspaar Festbett/Fließbett die Bettbewegung verbindet, wird als bedeutungsgebender Unterschied zugrundegelegt, insbesondere da eine begriffliche Unterscheidung für kontinuierliche und diskontinuierliche Prozesse existiert. Die Problematik der Abgrenzung wird diesen Merkmalen untergeordnet. Aus den dargelegten Gründen wird auch für einen kontinuierlichen Prozess der Begriff des Festbettes verwendet, wenn dieser keine wahrnehmbare bzw. stetige Bettbewegung aufweist.

Im Rahmen der Arbeit werden insbesondere die Produkte von Pyrolyse und Vergasung hinsichtlich ihres Aggregatzustandes unterschieden. Sofern kein anderer Bezug genannt wird, wird bei den Bezeichnungen für Aggregatzustände vorausgesetzt, dass dieser Aggregatzustand bei Standardbedingungen vorliegt. Der Begriff *Flüchtige* wird für alle bei Standardbedingungen nicht festen Stoffe und der Begriff *Kondensierbare* für alle bei Stan-

¹⁶ Vgl. engl. *up draft* gasification.

¹⁷ Vgl. engl. *down draft* gasification.

¹⁸ Im Englischen *inverted downdraft gasifier*.

¹⁹ Vgl. engl. *fixed bed*

²⁰ Vgl. engl. *moving bed*

dardbedingungen flüssigen, bei Vergasungs- oder Pyrolysebedingungen jedoch gasförmigen Stoffe, verwendet.

Stoffe, welche die Reaktionsgeschwindigkeit einer Reaktion aufgrund der Bildung eines temporären Oberflächenkomplexes mit einem oder mehreren der Reaktanden heraufsetzen, werden als Katalysatoren bezeichnet. Dabei nimmt der Katalysator an der Bruttoreaktion nicht teil²¹. Der Fall liegt bei porösen Kohlenstoffen, insbesondere aktivierter Kohle oder Biokohle anders. Diese nehmen als Reaktionspartner an einer Reaktion teil, auch wenn sie möglicherweise bei einer Reaktion in Summe nicht verbraucht oder gebildet werden. Zur Unterscheidung von dem Katalysator wird der Begriff *Promotor* verwendet.

2.2 Normierte Begriffe und Verfahren

Im Zusammenhang mit der rohstofflichen Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen wird diese zur Charakterisierung üblicherweise in Masseanteilen an Zellulose, Hemizellulose und Lignin beschrieben. Während diese Unterscheidung für die energetische Nutzung mittels der anaeroben Gärung von Bedeutung ist, ist für die thermochemische Nutzung die Charakterisierung nach Methoden für feste Brennstoffe zu bevorzugen. Allgemeine Fragen zur Prüfung fester Brennstoffe werden in der DIN 51 700 festgelegt. Der dieser DIN zugeordnete Satz Normen dient primär der Anwendung auf Kohle, jedoch ist sie gemäß der Anmerkungen auch für andere Stoffe anzuwenden, sofern diese als Brennstoffe eingesetzt werden.²²

Abweichend von DIN 51 701 werden die Analysenproben aufgrund der Beschaffenheit der Probe auf $\leq 0,5$ mm zerkleinert²³, da eine weitere Zerkleinerung zur Fraktionierung der Probe in einen faserigen ($\geq 0,2$ mm) und einen nicht faserigen ($\leq 0,2$ mm) Teil führt.

Der Gesamtwassergehalt wird aufgrund der geringen zur Verfügung stehenden Mengen abweichend zu DIN 51 718 nicht mit 2000 g, sondern mit dreimal 50 g bestimmt.

Die Gesamtgehalte von Kohlenstoff, Wasserstoff und Stickstoff werden simultan mit Hilfe eines Elementaranalysators der Firma CARLO ERBA, Modell 1106, durch Verbrennung in Sauerstoff bei 1023 °C und anschließender gaschromatographischer Analyse der Ver-

²¹ Der Katalysator kann in seiner Aktivität, z.B. durch die sogenannte Vergiftung, gemindert oder im Fall der Reaktionen mit Kohlenwasserstoffen durch Deposition in seiner Funktion beeinträchtigt werden [84]. Dies ist aber keine Reaktion im Sinne der relevanten Bruttoreaktion.

²² In den Jahren 2004 bis 2006 wurden Vornormen der DIN CEN/TS für Biomasse – in den Jahren 2009 und 2010 durch DIN EN Normen ersetzt – zur Verwendung anstelle der entsprechenden DIN 51 7xx für Kohle und andere Festbrennstoffe erarbeitet. Der größte Teil der Analysen wurde jedoch vor dieser Zeit durchgeführt. Daher wurde sich auch für nachfolgende Analysen aufgrund der Vergleichbarkeit auf die DIN 51 7xx bezogen, zumal die Abweichungen meist unwesentlich oder im Verfahren bereits umgesetzt sind.

²³ Vgl. DIN EN 14 774-3 und DIN EN 14 775

brennungsprodukte ermittelt²⁴. Der Sauerstoffgehalt wird als Differenz zur wasser- und aschefreien Brennstoffsubstanz errechnet.

Zur Berechnung des Brennwertes wird die Elementarzusammensetzung herangezogen. Es wird, nach Umrechnung auf SI-Einheiten anhand des Abschnitts Bb des VDI Wärmeatlasses [100], die von BOIE angegebene Korrelation für feste Brennstoffe verwendet [18]:

$$\frac{H_{o,wf}}{\text{MJ/kg}} = 34,834 c_{wf} + 115,912 h_{wf} + 10,467 s_{wf} + 6,28 n_{wf} - 10,802 o_{wf} \quad (2.1)$$

und für flüssige Brennstoffe, insbesondere Teer

$$\frac{H_{o,wf}}{\text{MJ/kg}} = 35,169 c_{wf} + 116,247 h_{wf} + 10,467 s_{wf} - 10,467 o_{wf} \quad (2.2)$$

²⁴ Vgl. Entwurf der DIN EN 15 104

