1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Seit vielen Jahren findet eine intensive Auseinandersetzung um eine mögliche Substitution fossiler Energieträger statt. Die Diskussion wurde insbesondere durch die Umwelt- und Klimaproblematik bei der Verwendung fossiler Energieträger, deren Endlichkeit sowie die Abhängigkeit der Industrienationen von gesicherten Energieimporten ausgelöst.

Vor dem dargestellten Hintergrund ist die Europäische Union bestrebt, den Klimaänderungen und einer höheren Abhängigkeit entgegenzutreten (KOMMISSION EU 1998). In diesem Kontext wird eine verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien angestrebt, wobei die energetische Nutzung von Biomasse einen entscheidenden Beitrag leisten soll. Der landwirtschaftliche Bereich ist hierbei ein elementarer Sektor der europäischen Strategie (KOMMISSION EU 1998).

Die Produktion regenerativer Energieträger kann der Landwirtschaft neue Perspektiven eröffnen. Neben der Bereitstellung „CO₂-neutraler“ Energieträger können neue Tätigkeiten und Verdienstmöglichkeiten in- und außerhalb der Landwirtschaft entstehen. Weiterhin bleibt die Flexibilität der Bodennutzung bewahrt, da jederzeit von der Nutzung von Biomasse zur Verbrennung auf deren Nutzung zur Nahrungsmittelproduktion umgestellt werden kann (BREITSCHUH und ECKERT 1994). Der gezielte Anbau von Energieträgern steht jedoch in Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion. Hierbei ist zu beachten, dass der Lebensmittelproduktion stets eine höhere Priorität als der Energiepflanzenproduktion eingeräumt werden sollte. Aus ethischer Sicht dürfte eine Diskussion zum Anbau nachwachsender Rohstoffe, wenn sie in europäischen Dimensionen geführt wird, sicher zu dem Ergebnis kommen, dass ein Anbau auf Flächen, die nicht mehr für die Nahrungsmittelproduktion benötigt werden, gerechtfertigt ist. Im globalen Zusammenhang muss diese Diskussion auf den Anbau von Futtermitteln und die bereits praktizierte energetische Nutzung von Biomasse ausgedehnt werden, wobei auf diese komplexe Fragestellung keine einfache Antwort zu erwarten ist (WIEST 1998).

Neben der CO₂-Neutralität und der Verfügbarkeit in nahezu allen Regionen zeichnen sich biogene Brennstoffe u. a. durch geringe Dichte und Energiedichte, Inhomogenität, ungünstiges Ascheschmelzverhalten, einen häufig hohen Wassergehalt, Verderblichkeit, ein jahreszeitlich stark schwankendes und sehr dezentrales Aufkommen sowie insgesamt eine schwankende Qualität aus (SCHEFFER 1992, WIEST 1998). Sollen zukünftig Biomassen aus der Landwirtschaft als regenerative Energieträger eingesetzt werden, ist eine Bevorratung erforderlich. Dies setzt Lagerfähigkeit bzw. Lagerstabilität der Energieträger voraus. Eine natürliche Lagerstabilität von Biomasse ist bei Wassergehalten von unter 15 % bis 20 % gegeben (HEINZ et al. 1999, SCHEFFER et al. 1996). Sollten diese für eine Lagerung notwendigen Wassergehalte nicht erreicht werden, besteht auch die Möglichkeit, feuchte Biomasse durch Silierung zu konservieren und vor ihrer energetischen Nutzung zu entwässern (HEINZ et al. 1999). Das bedeutet, dass Biomassen entweder im lufttrockenen Zustand geworben oder zu Silagen bereitet werden müssen (STÜLPNAGEL 1994).

Anlagen zur Energiewandlung erfordern für eine effiziente und emissionsarme Betriebsweise einen hohen verfahrenstechnischen Aufwand und damit einhergehend möglichst große Einheiten (WIEST 1998). Nach bisherigem Kenntnisstand gibt es kein Verfahren, das geeignet ist, unterschiedliche Biomassen thermisch zu nutzen. Die derzeitigen Verfahren benötigen stets einen Brennstoff mit speziellen Eigenschaften (HAHN 1994). Eine Abstimmung der Landwirtschaft auf diese Bedürfnisse würde große Monokulturen über den langen Zeitraum der Anlagennutzung hinweg bedeuten (WIEST 1998). Für eine gesellschaftliche Akzeptanz der nachwachsenden Rohstoffe ist jedoch auch die ökologische Unbedenklichkeit des Anbaues von erheblicher Bedeutung (KARPENSTEIN-MACHAN 1994). Das wiederum heißt, dass die Energieträgerproduktion nicht auf bestimmte Kulturpflanzen beschränkt werden sollte, sondern eine Vielfalt von Pflanzenarten zulassen müsste. Demzufolge muss ein neues Verfahren eine hohe Brennstoffflexibilität besitzen. Weiterhin sind Bodenerosion und Umweltschäden zu vermeiden und eine Verhinderung bzw. Minimierung von Nährstoffausträgen anzustreben (SCHEFFER und STÜLPNAGEL 1993, RINKE, 1999).

Nach Angaben von SCHINKEL (2002) verbietet sich aufgrund des niedrigen Brennwertes land- und forstwirtschaftlicher Biomassen ein längerer Transport, sodass deren energetische Nutzung vorzugsweise in dezentralen Anlagen, möglichst in enger räumlicher Nähe zum Anbaubereich bzw. zum Ort des Anfalls der Biomasse, erfolgen sollte (HEINRICH und JAHRAUS 2000). Der relevante Anwendungsbereich liegt dabei aus logistischen Gründen für deutsche Verhältnisse vernünftigerweise in einem Leistungsbereich von 1 bis 20 MW Feuerleistung (ISIG 2000). Sinnvoll ist daher der Einsatz von flexiblen, an die Spezifika der Biomassen angepassten kleineren Anlagen zur Umwandlung der Energieträger.

Grundsätzlich kommt für eine energetische Verwertung von Biomasse die direkte Nutzung als Festbrennstoff oder verschiedene Verfahren der Veredelung zu höherwertigen gasförmigen oder flüssigen Stoffen in Betracht (WIEST 1998). Die direkte Verbrennung stellt aus exergetischer Sicht die am stärksten verlustbehaftete Variante dar (WIEST 1998). Aufgrund ihrer Eigenschaften eignet sich Biomasse für die Vergasung. Hierbei werden feste organische Brennstoffe bei höheren Temperaturen thermochemisch in gasförmige Verbindungen umgewandelt. Es entstehen höherwertige Produkte mit besseren Lager-, Transport- und Verarbeitungseigenschaften (JENSEN 2001). In Abhängigkeit vom Vergasungsverfahren werden u. a. stickstoffreiche niederkalorige bzw. wasserstoffreiche mittelkalorige Gase erzeugt. Letzteres Verfahren bietet ideale Ausgangsbedingungen für ein breites Anwendungsspektrum, insbesondere zur Produktion regenerativen Wasserstoffes.

In herkömmlichen Anlagen verursachen land- und forstwirtschaftliche Energieträger häufig Probleme. So lassen sich beispielsweise stark wasserhaltige Biomassen, wie Silagen oder frisch geschlagenes Waldholz, gar nicht oder nur nach einer aufwendigen Trocknung zur Energiegewinnung verwenden (HAHN 1994, JENSEN 2001). Vor dem dargestellten Hintergrund wird seit 1997 am Institut für Thermodynamik der Universität Kassel ein allothermes Gleichstrom-Festbettverfahren zur Nutzung stark wasserhaltiger Biomassen entwickelt. Bei der Vergasung in einem indirekt beheizten Reaktor kann ein hoher Wassergehalt der Biomassen zur Vergasung mit Wasserdampf optimal genutzt werden. Das Verfahren lässt die Produktion eines wasserstoffreichen Gases erwarten.

Aufgrund der Reaktionsführung kann bei einem im Gleichstrom betriebenen Vergaser, bei dem die entstehenden Teere durch die heiße Vergasungszone geführt werden, ein teearmes Gas erzeugt werden (JENSEN 2001). Gleichstrom-Festbettvergaser verfügen in der Regel über kleine Leistungseinheiten, was eine dezentrale Anwendung zulässt.

1.2 Zielsetzung

In diesem Zusammenhang wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine Vielzahl an landwirtschaftlicher Biomasse zur Erzeugung eines wasserstoffreichen Gases experimentell untersucht. Weiterhin sollte die Eignung der Energieträger für eine Vergasung in einem allothermen Festbettvergaser erörtert werden.

Zur Darstellung des gesamten Spektrums an landwirtschaftlicher Biomasse wurden sowohl Silagen als auch trockene Energieträger, vorab auf die spezifischen Betriebsbedingungen der Versuchsanlage aufbereitet, unter sich ändernden Betriebsparametern vergast und der Einfluss auf das entstehende Produktgas ermittelt. In diesem Kontext wurden insbesondere folgende Parameter untersucht:

- die Erzeugung eines wasserstoffreichen Gases aus der zu untersuchenden Biomasse
- der Einfluss von Temperatur und Druck auf die Wasserstoffkonzentration
- die Gaszusammensetzung sowie der Einfluss von Temperatur und Druck auf deren Konzentrationen
- der Gasumsatz sowie der Einfluss von Temperatur und Druck auf dessen Ausbeute

Hinsichtlich der Eignung der Energieträger für das Vergasungsverfahren konnte davon ausgegangen werden, dass - in Abhängigkeit von der Biomasse - Probleme hinsichtlich der Brennstoffzufuhr, wie beispielsweise Verstopfung der Fördereinrichtung, Brückenbildung im Bunker oder Verkeilen der Dosierschnecke,

und demzufolge der Aufbau einer Schüttung und in diesem Zusammenhang Druckschwankungen, diskontinuierliche Gasproduktion und Gaszusammensetzung, auftreten würden. Weiterhin waren Brückenbildung und Anbackungen im Generator, welche im weiteren Betriebsverlauf zu Prozessschwankungen und Prozessstörungen führen können, sowie ein Schmelzen der Aschen (Agglomerationen) zu erwarten (BÜTTNER 2001, HEINZ et al. 1999, KATHER und WIESE 2004, RÖSCH und WINTZER 1997). Zur Charakterisierung der Brennstoffe wurden Elementar- und Immediatanalysen durchgeführt.

2 Einführung in den Themenkreis

2.1 Ausgangssituation

2.1.1 Klima und Treibhauseffekt

Die Klimageschichte zeigt, dass das irdische Klima schon immer Schwankungen unterlag. Meist vollzogen sich diese Klimaänderungen langsam, so dass sich die Biosphäre an die jeweils neuen klimatischen Bedingungen anpassen konnte. Dabei wechselten sich wärmere und kältere Phasen in einem mehr oder weniger regelmäßigen Rhythmus ab (HAHN 1994). Die früheren Klimaschwankungen waren meist mit einer Änderung der CO₂-Konzentration verbunden, allerdings enthielt die Erdatmosphäre in den vergangenen 160.000 Jahren niemals soviel CO₂ wie derzeit. Nach HAHN (1994) gilt es als gesichert, dass der Mensch in einem nie zuvor dagewesenen Umfang Einfluss auf das Klima nimmt. Diese Einflussnahme beruht u. a. auf der Bevölkerungsexplosion der vergangenen 150 Jahre und dem damit steigenden Bedarf an Energie (HAHN 1994).

Motor und Antrieb des Klimageschehens ist die solare Einstrahlung, die aufgrund der hohen Oberflächentemperatur der Sonne im Bereich von 0,5 μm liegt (HAHN 1994). Die von der Sonne ausgehende Strahlungsenergie beträgt an der äußeren Grenze der Erdatmosphäre 1,35 kW/m² (Solarkonstante, BMVEL 1990). Nur etwa 43 % dieser Strahlung erreicht als direkte Sonnenstrahlung oder diffuse Himmelsstrahlung die Erdoberfläche (Globalstrahlung). Geographi-

sche Breite, Höhe, Bewölkung und Sonnenstand bleiben hier unberücksichtigt (BMVEL 1990). Weitere 15 % der eingestrahnten Sonnenenergie werden durch Gase, sog. Spurengase wie beispielsweise Kohlendioxid, Methan, Wasserdampf, Distickstoff, Ozon, Fluorchlorkohlenwasserstoffe, in der oberen Lufthülle absorbiert, erwärmen diese und treten damit als langwellige Strahlung in den Wärmehaushalt der Erde ein (BMVEL 1990). Ein Teil der Globalstrahlung wird an der Bodenoberfläche zurückgestrahlt. Ein weiterer Teil wird absorbiert, führt zur Bodenerwärmung und damit zu einer langwelligeren Abstrahlung. Der langwellige Anteil der an der Bodenoberfläche reflektierten Globalstrahlung sowie die Wärmestrahlung des Bodens werden von den Treibhausgasen entsprechend ihrer Konzentration in der Atmosphäre adsorbiert, isotropisch wieder ausgestrahlt und führen dadurch zu der beobachteten Erwärmung der Troposphäre. Diese Gase erlauben den Eintritt der kurzwelligen Solarstrahlung in die Erdatmosphäre bis zur Boden- und Vegetationsoberfläche und behindern durch Absorption eine Rückstrahlung der langwelligen Wärmestrahlung in den Weltraum (BMVEL 1990). Dieses Phänomen wird mit dem Begriff „Treibhauseffekt“ bezeichnet. Als Folge des Treibhauseffektes liegt die mittlere Temperatur auf der Erdoberfläche bei etwa + 15 °C. Ohne die genannten Gase läge die Bodentemperatur bei ca. – 18 °C (OEHMICHEN 1992). Die Konzentrationen dieser Spurengase nehmen durch anthropogene Steigerung der entsprechenden Emissionen zu und führen, zusammen mit dem ausschließlich industriell hergestellten FCKW, zu einer Verstärkung des Treibhauseffektes (zusätzlicher Treibhauseffekt) (HAHN 1994).

Kohlendioxid ist mit ca. 50 % am zusätzlichen Treibhauseffekt beteiligt und das bei weitem wichtigste Treibhausgas (jährlich werden ca. 22 Mrd. t freigesetzt). Etwa fünf Sechstel des anthropogenen Kohlendioxid-Ausstoßes werden durch die Verbrennung fossiler Energieträger frei. Der Rest stammt aus Wald- und Bodenzerstörung (BMVEL 1990). Hierzu tragen Amerika, die ehemalige UdSSR und Osteuropa, China und Westeuropa ca. 76,1 % bei. Nach allen Erwartungen wird der CO₂-Ausstoß der Entwicklungsländer aufgrund ihrer demographischen und wirtschaftlichen Entwicklung in Zukunft enorm steigen (BMVEL 1990).

Der Methangehalt der Atmosphäre steigt seit Jahrzehnten drastisch an (ca. 1 % pro Jahr) und trägt ca. 19 % zum zusätzlichen Treibhauseffekt bei. Wichtige Ursachen sind die starke Zunahme des Reisanbaus und der Rinderhaltung, die

Biomasseverbrennung (beispielsweise Brandrodung in den Tropen), der Abbau von Stein- und Braunkohle, Emissionen aus Mülldeponien und Verluste bei der Erdgas- und Erdölgewinnung sowie bei der Versorgung der Abnehmer mit Erdgas (BMVEL 1990).

Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe sind mit rund 17 %, Ozon (O_3) mit ca. 8 % und Distickoxid (N_2O) mit etwa 4 % am zusätzlichen Treibhauseffekt beteiligt. FCKWs werden bei der Verwendung von Reinigungsmitteln und Treibgasen direkt freigesetzt oder bei der Verschrottung FCKW-haltiger Produkte (z. B. Kühlschränke). Sie haben keine natürlichen Quellen (HAHN 1994). Ozon ist ein Spurengas und schützt Lebewesen vor zellschädigender UV-B-Strahlung (Ozonschicht in der Stratosphäre) (BMVEL 1990). In der Troposphäre wirkt Ozon toxisch und ist maßgeblich an den Wald- und Pflanzenschäden beteiligt (Beeinträchtigung der Photosyntheseleistung durch geringere Aufnahme von CO_2 , mit einer entsprechenden Auswirkung auf den Treibhauseffekt). Hier wird Ozon in Anwesenheit von Stickoxiden photochemisch aus Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoff gebildet. Seine Konzentration steigt in der Nordhemisphäre jährlich um ca. 1 % an (BMVEL 1990). Distickstoff ist einerseits ein Treibhausgas und andererseits trägt es zum Abbau der stratosphärischen Ozonschicht bei. Die natürliche Hauptursache ist die mikrobiologische Denitrifikation im Boden. Wesentliche anthropogene Quellen sind die Verwendung stickstoffhaltiger Dünger in der Landwirtschaft, die Verbrennung von Biomasse in den Tropen und die Umwandlung von Waldgebieten in landwirtschaftliche Nutzflächen. Stickoxide (NO_x), die u. a. bei der Verbrennung von Biomasse entstehen, tragen im Gegensatz zu N_2O nicht unmittelbar zum Treibhauseffekt bei. NO_x bilden zusammen mit Wassertröpfchen in der Luft innerhalb weniger Tage Salpetersäure (werden durch den Niederschlag dem Boden zugeführt). Stickoxide sind aber auch an der Bildung troposphärischen Ozons beteiligt (BMVEL 1990). Als Folge des Treibhauseffektes ist mit einem globalen Temperaturanstieg auf der Erde zu rechnen (OEHMICHEN 1992). Nachfolgend werden in Tabelle 1 die erwartete Klimaänderung im 21. Jahrhundert sowie deren mögliche Auswirkungen auf die Land- und Forstwirtschaft dargestellt.