

# 1 Einleitung

Angesichts der Notwendigkeit, den Verbrauch fossiler Energieträger zu reduzieren, stellt die Verwendung der Biomasse als kohlenstoffhaltiger Energieträger eine vielversprechende Option dar. Diese Notwendigkeit ergibt sich aus der Endlichkeit der fossilen Energieressourcen und aus den lokalen und globalen Auswirkungen auf die Umwelt durch deren energetische Nutzung. Die Vorlage des offiziellen Berichts des Weltklimarats IPCC im Jahr 2007 führte zu einer Intensivierung der Diskussion um den Ausbau erneuerbarer Energien auf nationaler sowie internationaler Ebene.

Vor diesem Hintergrund wurde in der Bundesrepublik Deutschland das Erneuerbare Energien Gesetz, kurz EEG, verabschiedet [1]. Ziel dieses Gesetzes ist insbesondere die Förderung der Stromerzeugung auf der Basis erneuerbarer Energien. Das Gesetz verpflichtet die Stromproduzenten zur Abnahme und Einspeisung regenerativ erzeugten Stroms zu festgeschriebenen Vergütungssätzen. In der Folge entstanden in den letzten Jahren vermehrt Kraftwerksanlagen, in denen Biomasse als Brennstoff eingesetzt wird. Hierbei handelt es sich größtenteils um konventionelle Dampfkraftwerke kleineren Maßstabs.

Eine Alternative zur Verbrennung der Biomasse stellt die thermochemische Biomassevergasung dar. Diese Technik verspricht, besonders im kleinen Maßstab, höhere Wirkungsgrade als die konventionelle Dampftechnik. Sie eröffnet zudem weitere Möglichkeiten der Biomassenutzung, wie zum Beispiel die Umwandlung der Biomasse in synthetische Kraftstoffe.

Die Technik der Biomassevergasung ist jedoch mit bislang ungelösten Problemen behaftet. Das zentrale Problem ist die Entstehung von so genannten Teeren. Diese verursachen vielfältige Probleme in der Anlagentechnik. In der Vergangenheit wurden bereits vielfältige Anstrengungen zur Bewältigung der Teerproblematik unternommen. Die Bandbreite reicht von wissenschaftlichen Grundsatzuntersuchungen über die Teerentstehung bis hin zur technischen Entwicklung von Anlagen und Anlagenkomponenten im industriellen Maßstab.

Um die Teergehalte in Produktgasen bestimmen zu können, wurde von verschiedenen Forschungsinstitutionen eine Reihe von chemischen Analyseverfahren entwickelt. Die Bestimmung des Teergehalts erfolgt dabei grundsätzlich in zwei zeitlich und örtlich getrennten Schritten, nämlich der Probenahme vor Ort und der späteren Analyse im Labor. Auf diese Weise können die im Gas vorhandenen Teerspezies detektiert und mehr oder weniger genau quantifiziert werden.

Um darüber hinaus dynamische Vorgänge beim Betrieb von Vergasungsanlagen messtechnisch erfassen zu können, wurde ein kontinuierlich arbeitendes Messverfahren entwickelt.

Mit Hilfe des Verfahrens ist es möglich, den Gehalt an Teeren als kondensierbare Kohlenwasserstoffe sehr schnell zu bestimmen. Inhalt und Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung eines praxisorientierten Messgeräts zur kontinuierlichen Bestimmung von veränderlichen Teerkonzentrationen in Synthesegasen auf Basis der am IVD entwickelten Methode der Differenzteermessung. Mit Hilfe des Messgeräts sollten neue Möglichkeiten bei der Durchführung der notwendigen technischen Entwicklungsarbeit an Vergasungs- und Gasaufbereitungsanlagen eröffnet werden.

Im Verlauf der Arbeit wurden daher vielfältige Versuche und Messungen an Anlagen und Anlagenkomponenten durchgeführt. Auf diese Weise wurde zunächst das Messgerät schrittweise verbessert. Schließlich wurde die bis dahin nur wenig bekannte Dynamik bei der Entstehung der Teere und bei der Behandlung der teerhaltigen Gase untersucht. Die im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse können einen wesentlichen Beitrag zur Einführung der Vergasungstechnologie zur Marktreife und zu ihrem wirtschaftlichen Durchbruch leisten.

## **2 Biomassevergasung zur dezentralen Strom-, Wärme- und Kraftstoff-erzeugung**

Bei der thermochemischen Vergasung von Biomasse entsteht das Produkt- oder Synthesegas. Ziel ist die Erzeugung von heizwertreichen Gasen mit möglichst hohen Anteilen an Wasserstoff und Kohlenmonoxid. Als unerwünschtes Nebenprodukt entsteht eine Reihe hochsiedender Kohlenwasserstoffe, welche im Folgenden als Teere bezeichnet werden.

Das Produktgas lässt sich auf verschiedene Art und Weise zur reinen Wärmeerzeugung oder zur kombinierten Wärme- und Stromerzeugung nutzen. Darüber hinaus kann es in flüssige Kraftstoffe oder sonstige chemische Produkte wie Methan oder Methanol umgewandelt werden. Im Folgenden werden zunächst die verschiedenen Möglichkeiten der Gasnutzung und der Gaserzeugung erläutert. Vor diesem Hintergrund wird am Ende des Kapitels auf die Definition und die Entstehung des Teers eingegangen.

### **2.1 Gasnutzung**

#### *Thermische Nutzung*

Bei der rein thermischen Nutzung in Kraftwerken oder in Feuerungen in der Kalk-, Zement- oder Glasindustrie werden die geringsten Anforderungen aller denkbaren Nutzungen an die Gasqualität gestellt. Das Temperaturniveau wird auf dem Wege von der Gaserzeugung bis zu dessen Nutzung im Kessel möglichst hoch gehalten, um die sensible Wärme im Gas ausnützen zu können. Dadurch wird gleichzeitig die Kondensation von hochsiedenden Kohlenwasserstoffen vermieden. Auf eine Gasreinigung kann daher in der Regel verzichtet werden. Durch Vorschalten eines Vergasers können so auch bestehende, zuvor gas- oder ölgefeuerte Kessel mit Biomasse betrieben werden. Neben der vollständigen Umstellung kann auch eine Zufeuerung realisiert werden. Diese Möglichkeit wird bei kohlestaubgefeuerten Dampfkesseln genutzt und stellt eine interessante Alternative zur direkten Mitverbrennung von Biomassen in konventionellen Kraftwerken dar. Die Eigenschaften der Biomasse sind sowohl wegen ihres Ascheschmelzverhaltens als auch wegen ihrer chemischen Zusammensetzung problematisch und verursachen bei hohen Temperaturen, wie sie in Kraftwerksfeuerungen herrschen, Verschmutzungs- und Korrosionsprobleme [2]. Da die Asche bei der vorgeschalteten Vergasung im Vergaser verbleibt, treten diese Probleme hier nicht auf. Die Zufeuerung des Gases ist technisch einfach realisierbar und das Gas kann zudem als Stufenbrennstoff bei Reburning-Systemen zur Stickoxidemissionsminderung eingesetzt werden [3][4]. Anstelle der allgemein üblichen dezentralen Nutzung der Biobrennstoffe lassen sich

diese mit Hilfe eines vorgeschalteten Vergasers hervorragend in Großanlagen einsetzen. Der Vorteil von Großanlagen gegenüber dezentralen Anlagen ist die höhere energetische Effizienz und die geringeren Investitions- und Betriebskosten. Besonders in Skandinavien wurde diese Art der Produktgasnutzung vorangetrieben [5]. Ein Beispiel für eine bestehende Anlage ist das konventionelle Braunkohlekraftwerk mit vorgeschalteter Wirbelschichtvergasung im finnischen Lahti [6].

### *Direkte Stromerzeugung*

Zur Stromerzeugung in dezentralen Einheiten kommen derzeit Kolbenmotoren mit interner Verbrennung oder Turbinen, zukünftig auch Brennstoffzellen in Frage. Kolbenmotoren mit interner Verbrennung sind entweder fremdgezündete Gasmotoren nach dem Otto-Prinzip oder Zündstrahlmotoren, die nach dem Dieselpinzip arbeiten. Bei Motoren bis 5 MW sind Wirkungsgrade bis zu 40 % erreichbar, sie liegen also etwa im Bereich des konventionellen Dampfprozesses mittelgroßer Anlagen. Vorteilhaft ist hier, dass sich die Abwärme ohne Beeinflussung des elektrischen Wirkungsgrades nutzen lässt, während dieser bei der Wärmeauskopplung aus dem Dampfkreislauf gegenüber dem reinen Kondensationsbetrieb absinkt. Die Einspeisevergütungen für Strom aus Biomasse sowie die Zuschläge für die Wärmeauskopplung [7] sind in Tabelle 2.1 dargestellt.

**Tabelle 2.1:** Einspeisevergütung für Strom aus Biomasse und Kraftwärmekopplung

Leistungsgröße und Nutzung	Vergütung
Bis 150 kW <sub>el</sub>	11,5 ct/kWh
150 bis 500 kW <sub>el</sub>	9,9 ct/kWh
500 bis 5000 kW <sub>el</sub>	8,9 ct/kWh
Über 5000 kW <sub>el</sub>	8,4 ct/kWh
Nutzung von Waldrestholz	4 bis 6 ct/kWh zusätzlich
Erzeugung von KWK-Strom	2 ct/kWh zusätzlich
Erzeugung von KWK-Strom und Leistung kleiner 5000 kW <sub>el</sub>	2 ct/kWh zusätzlich

Der geringere Heizwert des Produktgases führt zu geringeren motorischen Leistungen als beim Erdgasbetrieb, die Leistungseinbuße beträgt etwa 40 %. Daher kommen meist Turbomotoren zum Einsatz. Für die Klopffestigkeit des Gases ist der Wasserstoffanteil von entscheidender Bedeutung. Je größer der Wasserstoffanteil ist, desto niedriger ist die

Methanzahl, welche ein Maß für die Klopfestigkeit des Brenngases, entsprechend der Oktanzahl beim Benzin, darstellt. Die Methanzahl limitiert das Verdichtungsverhältnis, das zur Erzielung eines hohen thermodynamischen Wirkungsgrades und einer hohen Leistungsdichte möglichst hoch sein soll. Um die Emissionsgrenzwerte einzuhalten, werden die Motoren mit einer Luftüberschusszahl  $\lambda$  von 1,6 bis 1,8, also extrem mager, betrieben. So kann eine Reduzierung der Verbrennungstemperaturen erreicht werden, was die Einhaltung von Stickoxidgrenzwerten ermöglicht. Da das Brenngas viel CO enthält, bekommt der durch die Überschneidung der Ventilsteuerzeiten bedingte Gasschlupf Bedeutung. Eine katalytische oder thermische Nachbehandlung des Abgases ist daher meist erforderlich [8].

Zündstrahlmotoren arbeiten thermodynamisch nach dem Dieselfverfahren, besitzen jedoch zusätzlich auch eine Gas-Regelstrecke. Zusätzlich zum Gasgemisch wird ein variabler Anteil von Diesel oder Rapsölmethylester, kurz RME, eingespritzt. Dieser Anteil an flüssigem Brennstoff kann zwischen 10 % und 100 % variiert werden. Das bringt den Vorteil mit sich, dass der Zündstrahlmotor notfalls auch bei Ausfall der Gaserzeugungsanlage mit voller Leistung gefahren werden kann. Der Wirkungsgrad von Zündstrahlmotoren kann bis zu 38 % betragen und ist besonders im Teillastbetrieb höher als bei Ottomaschinen.

Motoren mit interner Verbrennung stellen hohe Anforderungen an die Gasqualität bezüglich Teer- und Partikelbeladung. Besonders Teer führt zu Ablagerungen in der Motorenperipherie, also in der Ansaugstrecke, im Turbolader, auf den Ventilen und sogar in den Zylindern. Teer und Partikel führen zu einer Ölverschlechterung, was mechanischen Verschleiß an den Lagern und den Zylinderwänden verursacht und verkürzte Wartungsintervalle erforderlich macht.

Für größere Einheiten kommt die Gasturbine als Wärmekraftmaschine in Frage [9]. Problematisch ist die Kondensation des Teers in der Verdichterstufe. Wird für die Gaserzeugung ein druckaufgeladener Vergaser verwendet, entfällt dieses Problem. Da die Turbinen jedoch empfindlich auf Staubbeladung reagieren, das Temperaturniveau zwischen Gaserzeuger und Turbinenbrennkammer gleichzeitig jedoch hoch gehalten werden muss, ist der Einsatz einer Heißgasfiltration notwendig [10][11]. Um höhere elektrische Wirkungsgrade zu erreichen, wird der Gasturbine ein Dampfprozess nachgeschaltet. Bei dieser Konfiguration, die auch als Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) bezeichnet wird, lassen sich theoretisch Wirkungsgrade von über 40 % erreichen [12]. Atmosphärisch betriebene [13] und druckaufgeladene [14] Wirbelschichtanlagen mit GUD-Prozess wurden im Rahmen von Demonstrationsprojekten realisiert, die kommerzielle Einführung scheitert bislang jedoch aus betriebswirtschaftlichen Gründen.

Mittlerweile findet auch die aus der Flugzeugtechnik stammende Kleinturbine Beachtung. Im Rahmen des EU Projektes TARGET [15] wurde eine Brennkammer für den Einsatz von Schwachgas (LCV-Gas) für Kleinturbinen entwickelt. Der Wirkungsgrad dieser Kleinturbinen ist mit etwa 20 % jedoch eher gering, eine kommerzielle Realisierung steht aus.

Tabelle 2.2 gibt einen Überblick über die Anforderungen verschiedener Arbeitsmaschinen und weiterer Anwendungen an die Gasqualitäten und zeigt demgegenüber die von unterschiedlichen Gaserzeugern zur Verfügung gestellte Qualität.

**Tabelle 2.2:** Anforderungen von Gasmotoren und Turbinen an die Gasqualität [16][17][18][19][42][79][85]

	Teer [g/m <sup>3</sup> ]	Partikel [g/m <sup>3</sup> ]	Lam. Flammen- Geschwindigkeit [cm/s]	NH <sub>3</sub> /HCN [mg/m <sup>3</sup> ]
Gasmotor	< 0,1	< 0,05	> 8	50-100
Turbine	< 0,005	< 0,03	-	10 - 30
Methanolsynthese	< 0,0001	< 0,00002		< 0,0001
Gleichstromvergaser	0,1-5	0,1 - 3		150 - 1000
Gegenstromvergaser	3-100	0,2 - 6	Erfüllt, wenn H <sub>2</sub> -	150 - 1000
Wirbelschichtvergaser	0,5 - 5	2 - 50	Gehalt > 7 %	150 - 1000
2-stufige Vergaser	< 0,1	0,1 - 3		150 - 1000

Die Brennstoffzellentechnologie verspricht noch höhere elektrische Wirkungsgrade von bis zu 50 %. Da Brennstoffzellen auf Brenngasverunreinigungen empfindlich reagieren, stellen sie jedoch auch höhere Anforderungen an das Produktgas. Konkrete Aussagen von Herstellerseite hierzu fehlen bislang, man geht jedoch von einem Faktor 10 hinsichtlich Teerbelastung, verglichen mit der motorischen Nutzung aus. Ausreichende Gasreinigung vorausgesetzt, kommen Schmelzkarbonatbrennstoffzellen (MCFC) und festkeramische Brennstoffzellen (SOFC) in Frage [20]. Diese tolerieren im Gegensatz zu anderen Brennstoffzellen ein wesentlich breiteres Brennstoffband, das heißt es tritt keine Vergiftung der Zelle auf, wenn beispielsweise CO, CO<sub>2</sub> oder Kohlenwasserstoffe im Brenngas enthalten sind [21]. Ein weiterer Grund dafür, dass die Kombination der SOFC mit einem Biomassevergaser vielversprechend ist, ist ihre hohe Betriebstemperatur, die das Auskondensieren von schwerflüchtigen Kohlenwasserstoffen wie den Teeren vermeidet.