

Prozessorientierte Bewertung verschiedener Biomassen

Dr.-Ing. **S. Vodegel**, CUTEC Institut, Clausthal; Dipl.-Ing. **D. Bernhardt**, TU Dresden/VWS, Dresden; Dr.-Ing. **H.-J. Gehrman**n, Karlsruher Institut für Technologie/ITC, Karlsruhe; Prof. Dr.-Ing. **R. Weber**, TU Clausthal/IEVB, Clausthal

Kurzfassung

Das EEG ermöglichte die Markteinführung neuer Techniken der Stromerzeugung bei Biomassekraftwerken. Zu nennen sind besonders der ORC-Prozess und die Festbettvergasung. Neue Biomassen als Produkte der Landwirtschaft und Reststoffe verschiedener Branchen sind wünschenswert. Dabei zeigt sich, dass schon Ernte und Anbauort den thermischen Prozess beeinflussen. Das Entgasungsverhalten hängt von den Massenanteilen an Cellulose, Hemicellulose und Lignin ab. Alle untersuchten Biomassen zünden bei deutlich niedrigeren Temperaturen als Steinkohle. Zu beachten ist, dass auch zu Holz Unterschiede bei der thermochemischen Konversion bestehen, die von der Biomasseart abhängen.

1. Einleitung

Gemäß dem letzten EEG-Monitoring von DBFZ und TLL [1] waren Ende 2011 in Deutschland ca 260 Biomasse(heiz)kraftwerke mit einer installierten Leistung von rund 1.260 MW_{el} in Betrieb. Nahezu alle Anlagen arbeiteten ausschließlich mit Holz, obwohl in den Genehmigungen einiger Betreiber auch andere Biomassearten zugelassen sind. Der Holzpreis stieg seit Einführung des EEG in 2000 stark an; oft sogar über den Wert, welcher der Wirtschaftlichkeitsrechnung zum Zeitpunkt der Investitionsentscheidung zugrunde lag. Der Kosten- und Erlösdruck ist bei sehr vielen Anlagen hoch. Ein Ausweg wäre der Bezug alternativer preiswerter Biomassen. Damit zu befürchten sind technische Schwierigkeiten hinsichtlich Brennstoffaufgabe, Ascheaustrag, Verschlackung, Korrosion und Emissionen. Idee des IGF-Vorhabens *Prozessorientierte Biomassebewertung* [2] ist es, den Gesamtvorgang der thermochemischen Konversion in die Einzelschritte Pyrolyse, Vergasung und Verbrennung aufzuteilen. Aus den Ergebnissen sollen Kennzahlen oder Regeln erarbeitet werden, um die Erweiterung der Brennstoffpalette mit möglichst geringen apparate- und verfahrenstechnischen Änderungen durchführen zu können.

2. Technik deutscher Biomassekraftwerke

Im Rahmen des Verbundvorhabens wurde eine Datenbank erstellt, welche ihren Input durch Betreiber und öffentlich zugängliche Informationen bekommt. Mit mittlerweile 302 enthaltenen Anlagen sind einige technische Auswertungen möglich. So ist zu erkennen, dass sich bei den Inbetriebnahmen drei zeitliche Stufen der bevorzugten Technologie ergeben (s. Bild 1).

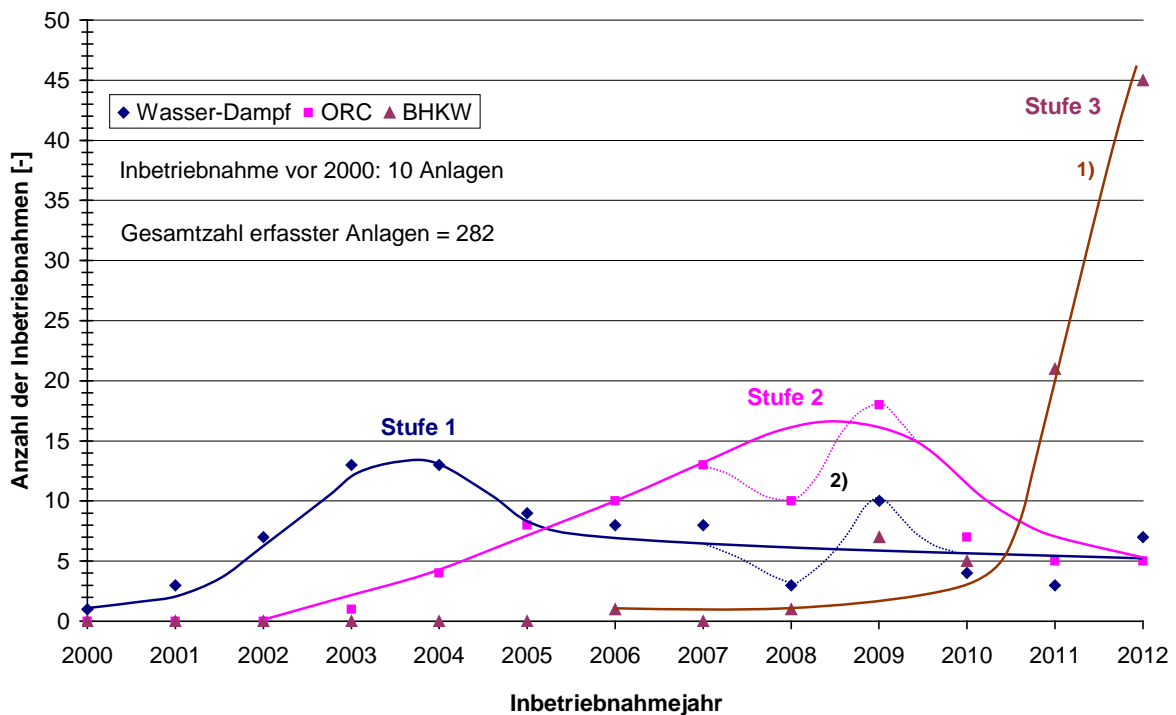


Bild 1: Entwicklung der bevorzugten Technologie zur Stromerzeugung

Bem.: • Gestrichelte Linien = Neben-Extremwerte, ausgelöst durch EEG-Revision für 2009

- unter „Anlage“ wird ein Standort verstanden

Die Stufe 1 startete unmittelbar nach Inkrafttreten der ersten Fassung des EEG. Mit Planungs- und Bauphase erreichte sie ihr Maximum in den Jahren 2003 und 2004. Technologisch ist sie gekennzeichnet durch die traditionelle Stromerzeugung über Wasser-/ Dampf-Kreislauf und Turbine. Viele der Kraftwerke arbeiten mit Altholz der Klasse A IV. In der Abgasreinigung besitzen diese Ausrüstungen gemäß der 17. BImSchV. Wegen der Investkosten werden hohe Anlagengrößen im Bereich 10 bis 20 MW_{el} bevorzugt. Die Feuerungen arbeiten mit Rost oder Wirbelschicht.

Ab 2003 etablierte sich die Stromerzeugung mit ORC (Organic-Rankine-Cycle)-Prozess. Die Technologie gewann zunehmend an Vertrauen mit einem Inbetriebnahmemaximum in 2009. Die Anlagen arbeiten fast alle mit Frisch- oder A I-Holz. Verwendet wird immer ein Rost. Seit 2008 nimmt die Zahl kleiner Vergaseranlagen drastisch zu. Zu nennen sind v.a. die Firmen Spanner Re² und Burkhardt als Anlagenbauer.

Die Technik der eingesetzten thermochemischen Konversion lässt sich gut der Größe der Anlage (gemessen als elektrische Bruttoleistung) zuordnen (s. Bild 2). So dominieren im Bereich kleiner 150 kW_{el} ganz klar die Festbettvergaser mit Gleichstromführung. Bei 185 kW_{el} verkaufen sich Anlagen der Fa. Burkhardt gut. Die Dominanz der Rostfeuerung beginnt aber deutlich.

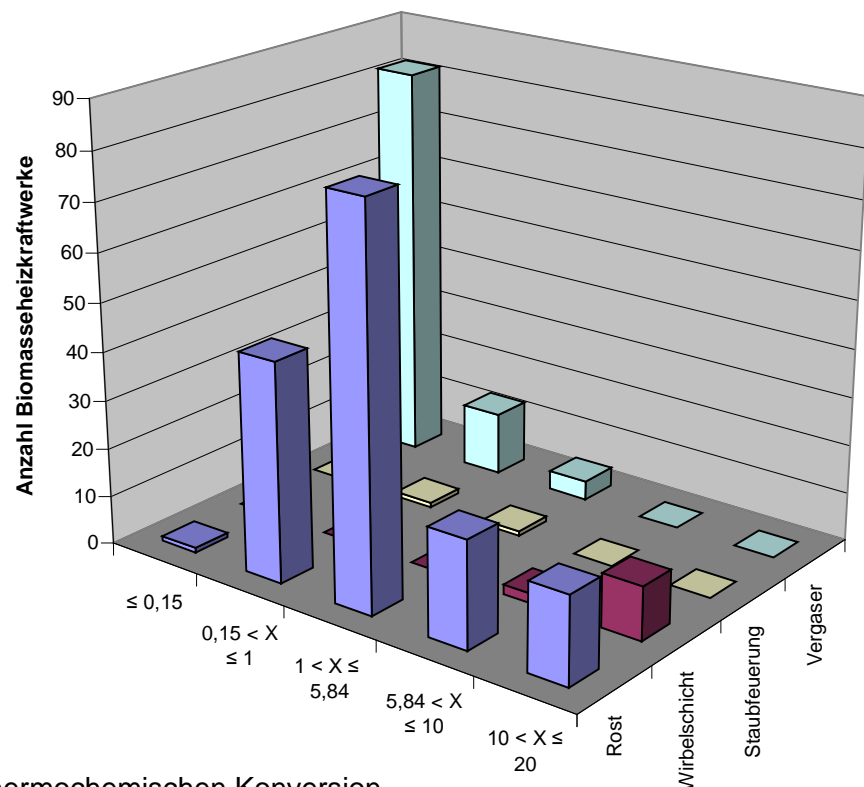


Bild 2: Techniken der thermochemischen Konversion

Bem.: Leistungseinteilung orientiert sich am EEG. Die Größe 5,84 MW wurde eingeführt, um die Realität besser abzubilden. Die Kraftwerke fallen meist in die 5 MW-Klasse

Sie setzt sich bis 20 MW_{el} fort, wobei im Bereich 10 bis 20 MW_{el} die Wirbelschichten eine echte Konkurrenz darstellen. Reine Staubfeuerungen spielen keine Rolle. Sägespäne werden oft durch Einblasen bei Rostfeuerungen verwertet.

Den Klasseneinteilungen gemäß EEG lassen sich auch bei der Stromerzeugung verschiedene Technologien schön zuordnen (s. Bild 3).

Zu den Vergasern passen die Blockheizkraftwerke (BHKW). Die Fa. Gammel Engineering nahm Varianten mit Gasturbine in Betrieb. Die Roste im Bereich $0,15 < X \leq 1 \text{ MW}_{el}$ lassen sich bevorzugt mit der ORC-Stromerzeugung in Verbindung bringen. Im Bereich $1 < X \leq 5,84 \text{ MW}_{el}$ liegen ORC- und Wasser-/Dampf gleichauf. Danach bricht der Einsatz aller neuen Stromerzeugungsarten ab.

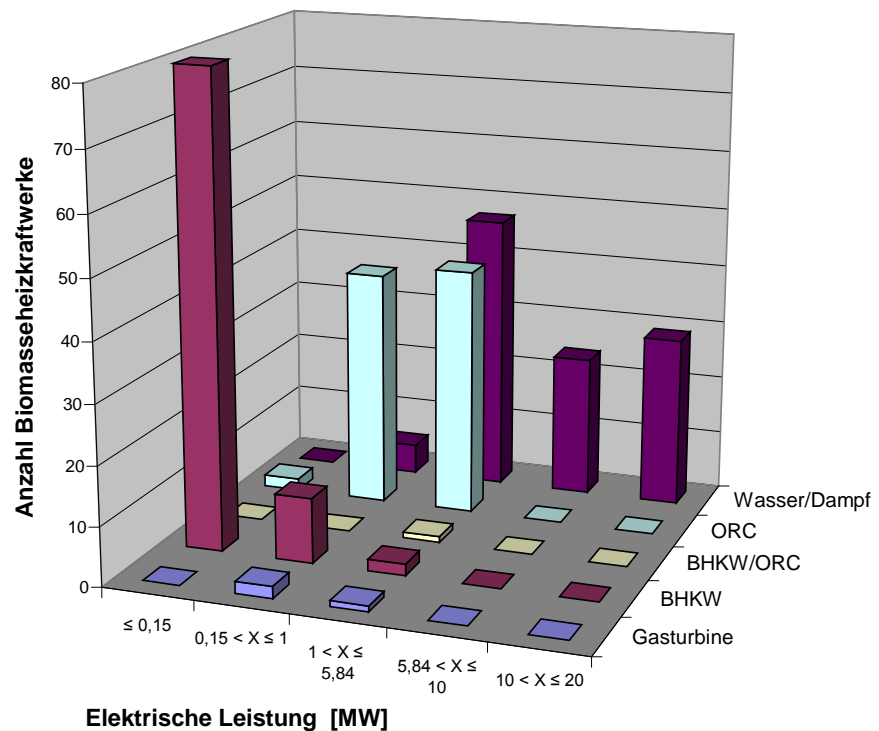


Bild 3: Stromerzeugung

Interessant ist auch die Zuordnung der eingesetzten Holzarten zu den Leistungsklassen des EEG (s. Bild 4). So arbeiten die Vergaser nahezu ausschließlich mit Frischholz. Die ORC-Betreiber beziehen bevorzugt Frischholz; aber auch unbelastetes A I kommt verstärkt zum Einsatz. A IV-Holz dagegen wird bevorzugt bei den größeren Anlagen ab 5,84 bis 20 MW_{el} eingesetzt.

Im krassen Gegensatz zu der anzahlbezogenen Auswertung steht die leistungsbezogene Version. Danach besitzen die Großanlagen mit einer Zulassung für A IV-Holz einen Anteil von 47 % der installierten Leistung.

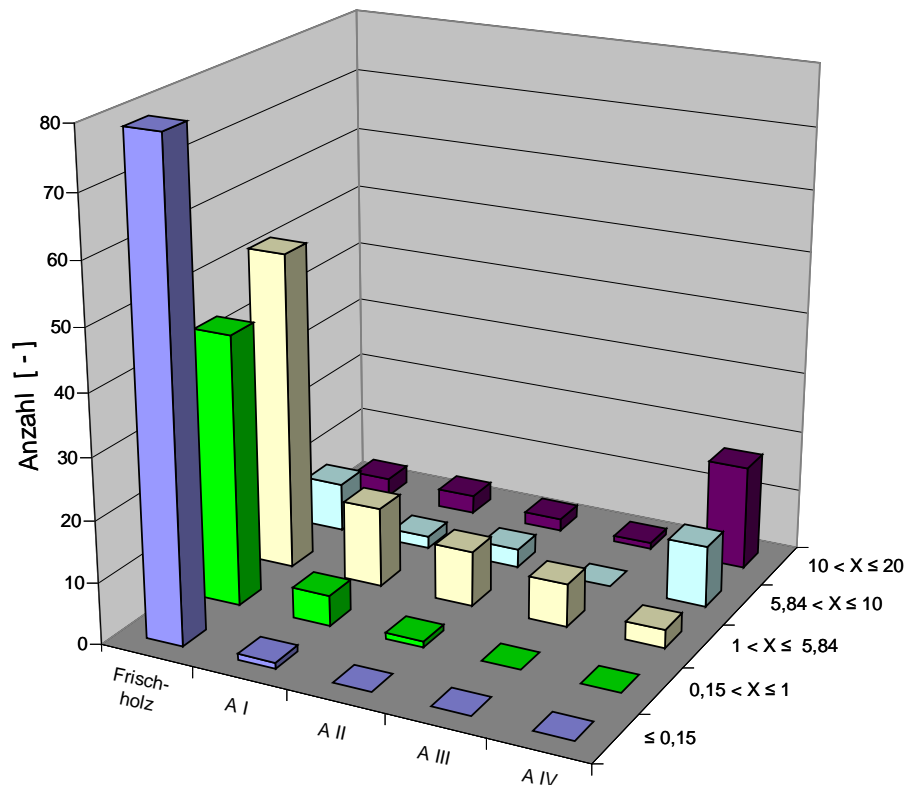


Bild 4: Eingesetzte Holzarten (anzahlbezogen)

Die Holzart besitzt Einfluss auf die installierte Gasreinigung (s. Bild 5). Die Vergaseranlagen unterhalb 150 kW_{el} arbeiten alle mit einfachen Gewebefiltern zur Entstaubung. Im Bereich 0,15 > X ≤ 5,84 MW_{el} dominieren schlagartig Elektrofilter. Jenseits von 10 MW_{el} sind sie dagegen nicht mehr zu finden. Die Gewebefilter der größeren Anlagen und bei Einsatz von Altholz III und IV sind i.d.R. als Trockensorption konzipiert, um Schadstoffe aus dem Gas herauszuholen. Die meisten Verbrennungsanlagen besitzen einen Zyklon nach der Feuerung, um die nachgeschaltete Abgasreinigung vor Funken zu schützen.

Die SNCR ist ab 1 MW_{el} häufiger zu finden, aber nicht die Regel. Von den 302 erfassten Anlagen besaßen vier einen Wäscher.

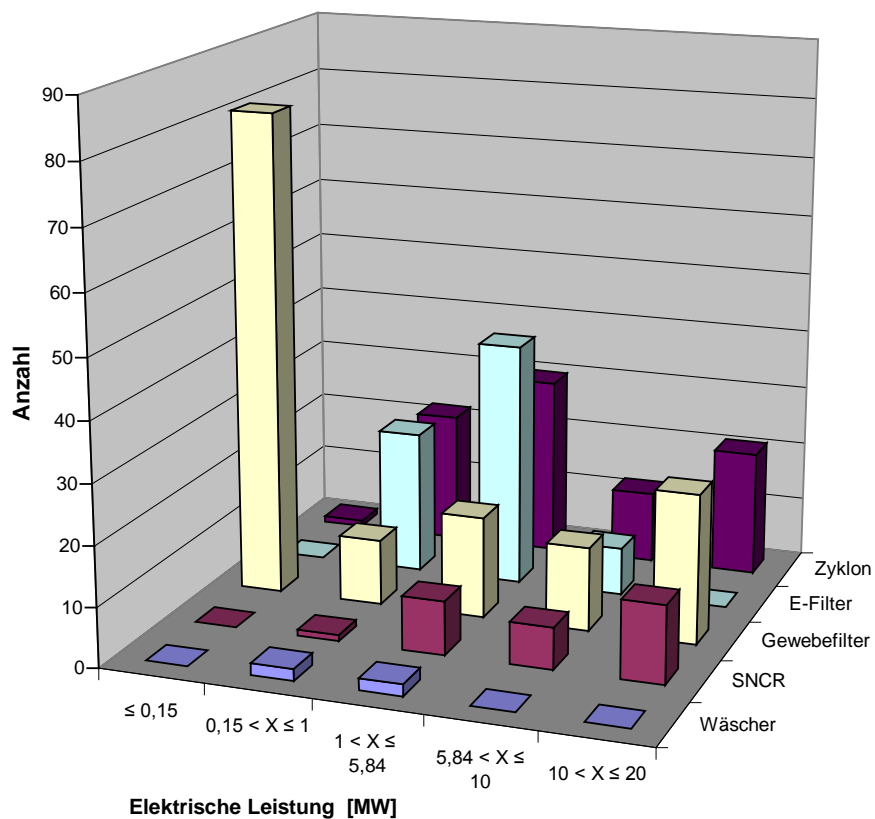


Bild 5: Gasreinigungen

3. Erfahrungen mit der Aufbereitung

Im Vorhaben wurden die zu untersuchenden Biomassen in sechs Gruppen eingeteilt (s. Tabelle 1).

Tabelle 1: Einteilung der Biomassen

Holzartig	Halmgutartig	Fruchtstämmig	Reste aus der Landwirtschaft	Reste aus der Lebensmittelherstellung	Reste aus der Zersetzung
Nadel-/Laubholz KUP 1: Weide KUP 2: Pappel KUP 3: Robinie	Weizenstroh Hirschgras Switchgras	Kirschkerne Pflaumensteine Haselnussschalen Erdnussschalen	Getreidereststoffe Grünschnitt Reisspelzen	Zuckerrübenschnitzel Rohkaffeestaub Biertreber Rapsschrot Rapspresskuchen	Gärreste

Alle Biomassen werden von Firmen aus unterschiedlichen Branchen bezogen. Einige Biomassen wie z.B. die Hölzer der Kurzumtriebsplantagen (KUP) oder das Switchgras entstammen Versuchsflächen. Geerntet wurden sie mit herkömmlichen Methoden. Die Halmgüter wurden in Ballen angeliefert.

Bei der Zerkleinerung für Versuche in einem Wirbelschichtreaktor war eine zweistufige Vorgehensweise, bestehend aus häckseln und schneiden, notwendig. Das zerkleinerte Material verließ die zweite Stufe durch ein austauschbares Sieb. Getestet wurden die Maschenweiten 7, 20, 40 und 60 mm. Dabei stellte sich heraus, dass Ergebnisse als Funktion der Häcksellänge zwar herzustellen, aber oft nicht reproduzierbar oder eindeutig waren. Beispielhaft sei der Durchsatz durch die Austragsschnecke (ATS) aus dem Biomassebunker genannt (s. Bild 6).

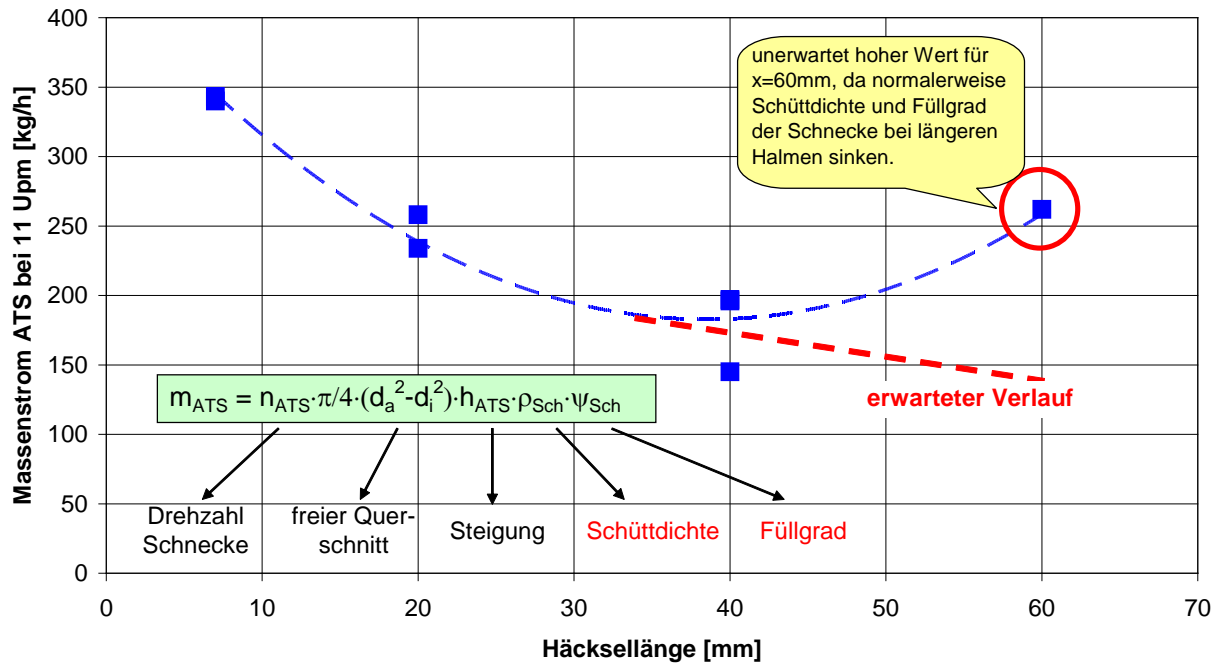


Bild 6: Massenstrom zerkleinerten Switchgrases als Funktion der Häcksellänge

Ursachenforschung zeigte, dass erhaltene Größen wie der Energieverbrauch bei der Zerkleinerung oder die Teerbildung als Funktion der Häcksellänge nicht nur von der Biomasseart, sondern auch vom Anbauort und dem Erntezeitpunkt signifikant abhängen. Dies ist in Extremfällen schon optisch zu erkennen (s. Bild 7). Die Bestimmung der Brennstoffeigenschaften reicht nicht aus, um das Verhalten zuverlässig zu prognostizieren. Bei der Kommerzialisierung der Ergebnisse wird eine Erfahrungssammlung mit den neuen Biomassen in der Landwirtschaft ratsam sein.

Bild 7: Lieferungen von Switchgras aus unterschiedlichen Anbaugebieten mit verschiedenen Erntezeitpunkten



4. Entgasungs- und Zündverhalten

Wie bei allen Festbrennstoffen wird das Entgasungs- und Zündverhalten von Biomassen von einer Reihe von Einflussfaktoren bestimmt (Aufheizrate, Gasatmosphäre, Korngröße, Oberflächenbeschaffenheit, chemischer Aufbau, usw.). Anders als bei Kohlen lässt sich der chemische Aufbau von pflanzlichen Biomassen durch die drei Makromoleküle Hemicellulose, Cellulose und Lignin sowie den sog. Extraktstoffen beschreiben. Wie Bild 8 zeigt ist das Entgasungsverhalten der Einzelkomponenten sehr unterschiedlich. Es wird deutlich, dass sich sowohl die Menge an freigesetzten flüchtigen Verbindungen als auch der Temperaturbereich, in dem die Hauptentgasung stattfindet (auch die max. Entgasungsgeschwindigkeit), unterscheiden.

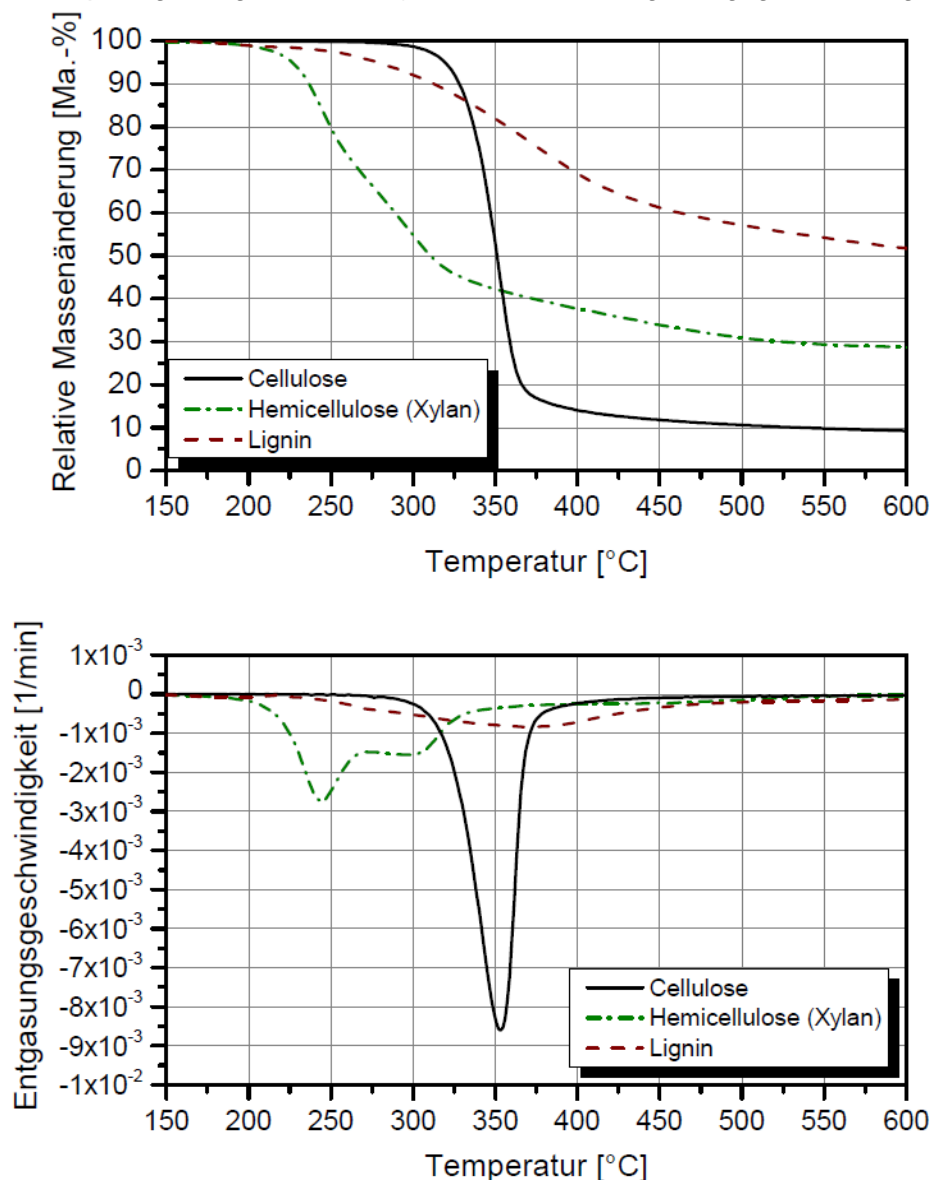


Bild 8: Entgasungsverhalten der Hauptbestandteile von Biomasse ($\beta=10$ K/min; $V_{N_2}=100$ ml/min)

In der Reihenfolge Cellulose, Hemicellulose und Lignin nimmt der Gehalt an flüchtigen Verbindungen ab. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass Lignin den größten Anteil an fixem Kohlenstoff bildet und Hemicellulose und Cellulose die hauptsächlich flüchtigen Verbindungen darstellen. Bei ca. 250 und 300 °C erfolgt die Hauptentgasung der Hemicellulose, bei ca. 350 °C der Cellulose und bei ca. 375 °C des Lignins. Vor allem das Lignin entgast dabei über einen breiten Temperaturbereich. Das Entgasungsverhalten von Biomassen wird daher auch durch den Gehalt der einzelnen Komponenten bestimmt, was zu einer Überlagerung der Einzelkurven führt. Zusätzlich ist hervorzuheben, dass die Zusammensetzung der gasförmigen Zersetzungsprodukte und der Energiegehalt einen großen Einfluss auf z. B. das Zündverhalten haben. Bekannt ist, dass bei der Cellulosezersetzung (Hauptbestandteil von Biomassen) zunächst die nichtbrennbaren Gase CO_2 und H_2O freigesetzt werden. Erst bei höheren Temperaturen bestehen die flüchtigen Bestandteile überwiegend aus den brennbaren Gasen CO , CH_4 , H_2 und längeren Kohlenwasserstoffen [3].

Um physikalische Vorgänge und chemische Reaktionen zu bestimmen, wurden Untersuchungen an einer Technischen Thermowaage durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass die flüchtigen Bestandteile hauptsächlich in einem engen Temperaturkorridor zwischen 200 °C und 600 °C bei Gärresten und Switchgras bzw. zwischen 250 °C und 600 °C bei den restlichen Biomassen austreiben (s. Bild 9).

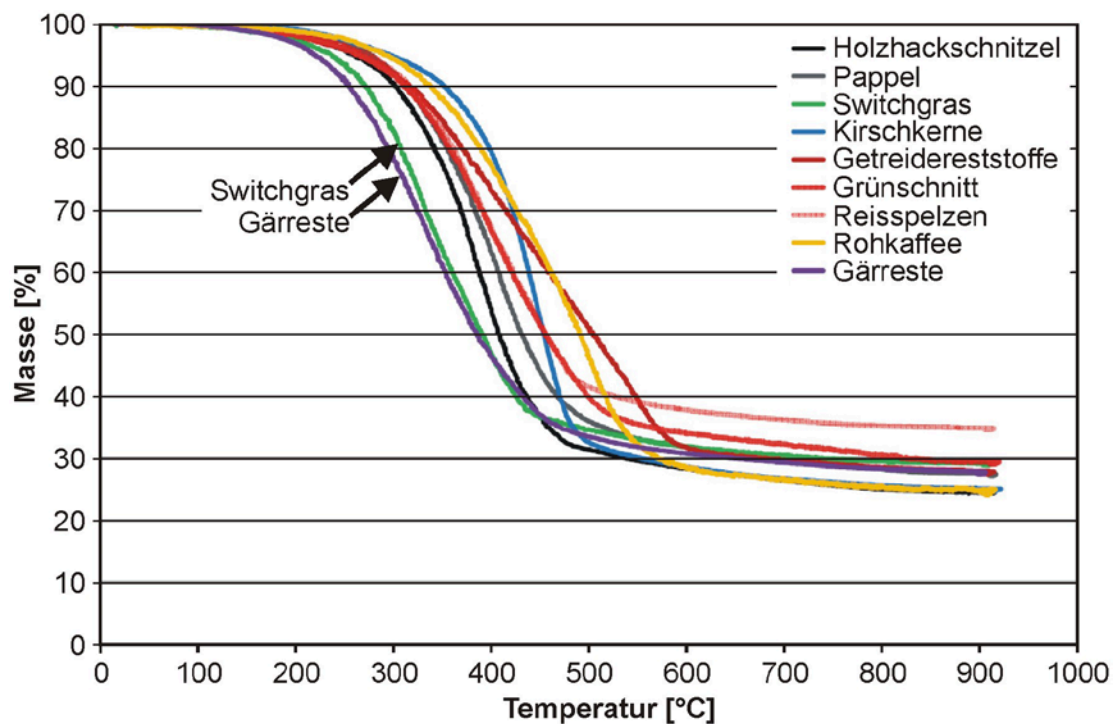


Bild 9: Versuchsergebnisse Technische Thermowaage; Masseverlust der untersuchten Biomassen

Der Restkoksgehalt ist bei allen untersuchten Biomassen recht gering und liegt zwischen 25 und 35 Ma.-%. Nach den Untersuchungen wurde der (schwersiedende) Teer analysiert mit dem Ergebnis, dass die Biomasse Pappel unter den untersuchten Biomassen mit ca. 19,5 % den größten und die Getreidereststoffe mit ca. 9 % den niedrigsten Teergehalt besitzen.

Zur Bestimmung der Zündtemperatur wurde ein Laborzündofen verwendet. Als charakteristische Zündtemperatur T_{Z150} wird diejenige Ofentemperatur angenommen, bei der die Zündung in Luftatmosphäre nach einer Zündverzögerung von 150 ms eintritt. Die Zündverzögerung ist die vom Einblasen der Staubprobe bis zur Zündung vergangene Zeit. Die charakteristische Zündtemperatur hat bei Rohkaffee mit 621 °C den niedrigsten Wert unter allen untersuchten Biomassen und bei Reisspelzen mit 707 °C den höchsten Wert (s. Bild 10). Zum Vergleich beträgt die charakteristische Zündtemperatur von Middelburg-Steinkohle 780 °C.

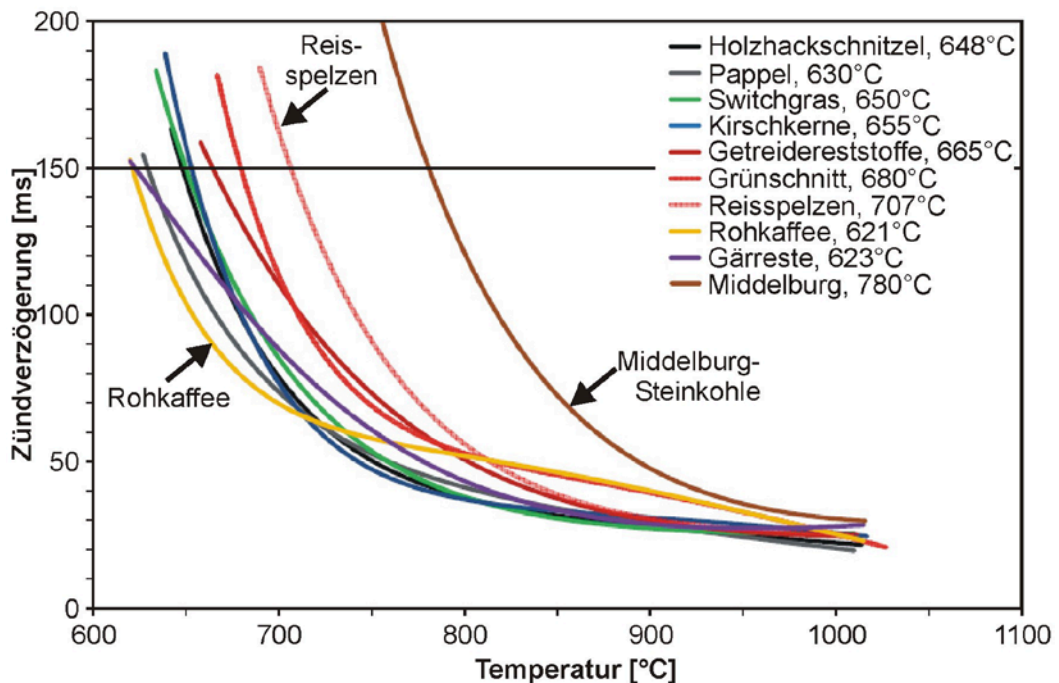


Bild 10: Zündverhalten verschiedener Biomassen und von Middelburg-Steinkohle

5. Verwendete Quellen

- [1] *Monitoring zur Wirkung des Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) auf die Entwicklung der Stromerzeugung aus Biomasse*; Deutsches BiomasseForschungszentrum (DBFZ) und Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL), FZK: 03MAP139, März 2012
- [2] IGF-Verbundvorhaben *Prozessorientierte Biomassebewertung*; gefördert durch BMWi über AiF und GVT, FKZ 17223 BG, 2013
- [3] H. Yang, R. Yan, H. Chen, D. H. Lee, C. Zheng, *Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis*, Fuel 2007, 86, 1781–1788