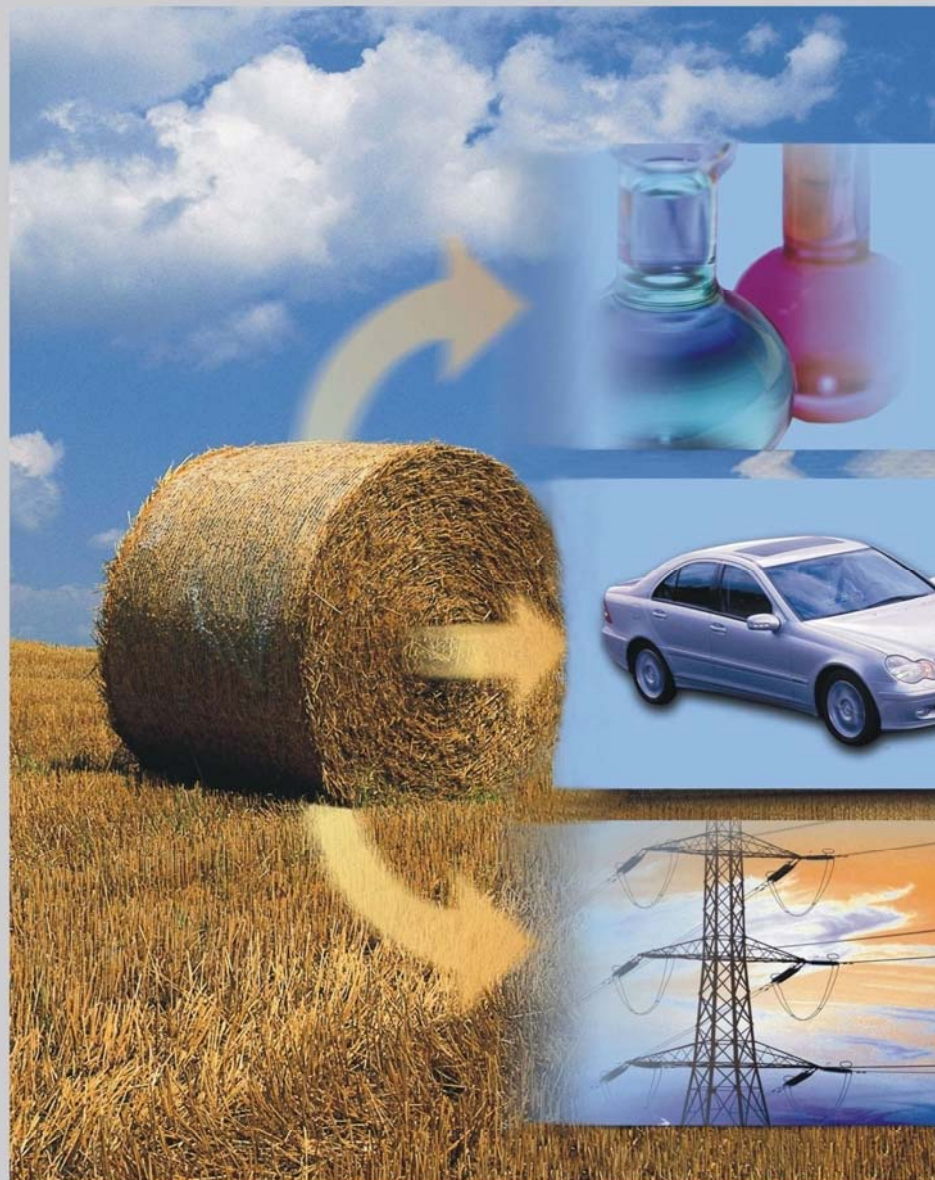


Gaserzeugung aus Biomasse

Abschlussbericht

- *Kurzfassung* -

Dr. Lothar Malcher (PL UMWELT)
Dr. Edmund Henrich (ITC-CPV)
Dr. Ludwig Leible (ITAS)
DI Hans-Joachim Wiemer (IKET)



Wissenschaftliche Vorarbeiten für den Bau einer 1 – 2 MW Versuchsanlage im Forschungszentrum Karlsruhe zur Pyrolyse und Vergasung von Rest- und Abfallstoffen aus der Land- und Forstwirtschaft

Kurztitel: Gaserzeugung aus Biomasse

Abschlussbericht

– Kurzfassung –

Projektkoordination: Dr. Lothar Malcher (Programmleitung UMWELT)

Projektteil I	Projektteil II	Projektteil III
ITAS ¹⁾ Dr. Ludwig Leible Beate Fürniß DI Stefan Kälber DI Gunnar Kappler DI Stephan Lange DI Eberhard Nieke Dr. Peter Proplesch Dr. Detlev Wintzer	ITC-CPV ²⁾ Dr. Edmund Henrich Dr. Andrea Kögel Dr. Klaus Raffelt Dr. Ralph Stahl DI Joachim Steinhardt DI Friedhelm Weirich	IKET ³⁾ DI Hans-Joachim Wiemer DI (FH) Sabine Baur Dr. Dietmar Kuhn Dr. Lambert Krebs Prof. Dr. Thomas Schulenberg DI Ulrike Santo (ITC-TAB) ⁴⁾ Prof. Dr. Thomas Kolb (ITC-TAB) Prof. Dr. Hellmut Seifert (ITC-TAB) DI Emmanouil Pantouflas (Uni KA EBI) ⁵⁾ Prof. Dr. Nikolaos Zarzalis (Uni KA EBI)

Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft

¹⁾ Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse

²⁾ Institut für Technische Chemie – Bereich Chemisch-Physikalische Verfahren

³⁾ Institut für Kern- und Energietechnik

⁴⁾ Institut für Technische Chemie – Bereich Thermische Abfallbehandlung

Universität Karlsruhe

⁵⁾ Engler-Bunte-Institut – Bereich Verbrennungstechnik

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Ministeriums für Ernährung und Ländlichen Raum Baden-Württemberg (MLR) gefördert (Staatshaushaltsplan 2002 – Kap. 1221 Tit. 981 82, Aktenzeichen 46(54)-8214.07).

Laufzeit des Projekts: 01. Juni 2002 bis 30. Juni 2005

Danksagung: Das Forschungszentrum Karlsruhe und die beteiligten Institute bedanken sich beim Ministerium für Ernährung und Ländlichen Raum (MLR) Baden-Württemberg für die finanzielle Unterstützung dieses Projekts.

Der Abschlussbericht wurde anlässlich einer Pressekonferenz am 24. Januar 2006 der Öffentlichkeit vorgestellt.

Vorbemerkungen

Eine Arbeitsgruppe „Gaserzeugung aus Biomasse“ innerhalb des FZK–Programms „Nachhaltigkeit, Energie- und Umwelttechnik“ hatte vor dem Hintergrund der sich laufend verknappenden Energievorräte und der zunehmenden CO₂-Belastung der Umwelt Anfang 2000 die Vision, im Forschungszentrum Karlsruhe (FZK) eine Pilotanlage zur Umwandlung halmgutartiger Biomasse in ein Synthesegas zu errichten, das dann mit teilweise vorhandenen Verfahren zu verschiedenen Endprodukten wie Bio-Kraftstoffen, chemischen Grundstoffen und elektrischer Energie umgewandelt werden könnte. Das hierbei verfolgte BTL-Konzept (Biomass-to-Liquid) ist in Abb. 1 wiedergegeben.

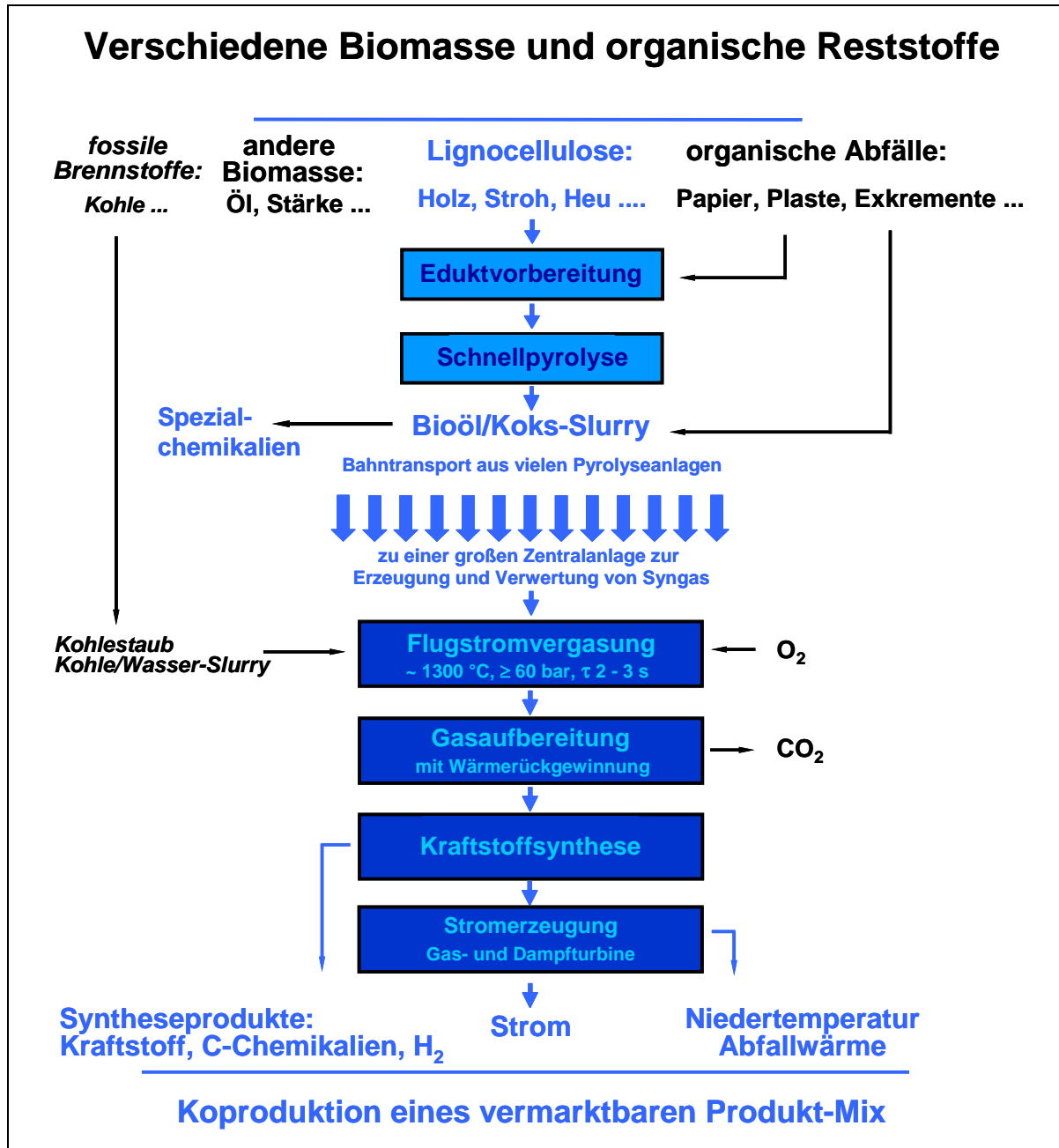


Abb. 1: Konzept des zweistufigen BTL-Verfahrens zur Herstellung von Kraftstoffen, Chemikalien und Strom aus Biomasse: 1. dezentrale Biomasseverflüssigung durch Pyrolyse, 2. Vergasung der Slurries oder Pasten in zentralen Großanlagen

Das Ministerium für Ernährung und Ländlichen Raum (MLR) Baden-Württemberg war die erste Institution, die die Förderwürdigkeit dieses Verfahrensansatzes erkannte. Unser Antrag vom 14.09.2001 mit dem Titel „Wissenschaftliche Vorarbeiten für den Bau einer 1-2 MW-Versuchsanlage im Forschungszentrum Karlsruhe zur Pyrolyse und Vergasung von Rest- und Abfallstoffen aus der Land- und Forstwirtschaft“ wurde am 24. Mai 2002/7. Juni 2002 vom MLR bewilligt. Die Mittel wurden im Rahmen des Sonderprogramms „Zukunftsoffensive III“ bereitgestellt.

Die Ziele des Projekts sind wie folgt definiert:

„Mit dem Projekt soll das Energiepotenzial von trockener Rest- und Abfallbiomasse aus der Land- und Forstwirtschaft besser erschlossen und eine höherwertige Nutzung ermöglicht werden. Es sollen neue und möglichst wirtschaftliche Gesamtkonzepte zur Gaserzeugung und Gasnutzung aus Biomasse entwickelt werden. Dabei steht die kombinierte Erzeugung von Kraftstoff und Strom aus Stroh und strohähnlichen Stoffen im Mittelpunkt.“

Das Projekt gliedert sich in drei Teilprojekte, die von drei verschiedenen, aber eng zusammenarbeitenden Instituten des Forschungszentrums bearbeitet werden.

Im **Projektteil I** werden die systemanalytischen Untersuchungen durchgeführt, die Hand in Hand mit den technischen Problemstellungen und Lösungsansätzen bearbeitet werden. Wichtige Aspekte sind die vergleichende Bewertung des eigenen Verfahrensansatzes mit konkurrierenden Prozessen und Verfahren zur energetischen Nutzung halmgutartiger Biomasse, aber auch von Waldrestholz zur Wärme-, Strom- und Kraftstoffherzeugung. Dies schließt eine Regionalanalyse zum Aufkommen und zur Verfügbarmachung der Biomasse in Baden-Württemberg mit ein.

Im **Projektteil II** wird die Eignung eines Schnellpyrolyseverfahrens, das hohe Ausbeuten an Kondensaten und Pyrolysekoks verspricht und welches bereits im Einsatz für fossile Brennstoffe (Kohle, Erdöl) war, auf seine Eignung zur Behandlung von Stroh und anderen halmgutartigen Stoffen untersucht.

Im **Projektteil III** stehen Fragen im Mittelpunkt, die mit der Vergasung der aus der Pyrolyse gewonnenen Substanzen im Zusammenhang stehen, wie z.B. die Entwicklung geeigneter Brenner-Düsen und das Zerstäubungsverhalten der zum Einsatz kommenden Suspensionen hinsichtlich Partikelverteilung und -geschwindigkeit. Begleitend wird hierzu eine modelltheoretische Entwicklung betrieben, um ein mathematisches Werkzeug für Auslegungs- und Optimierungsfragen zur Hand zu haben.

Die Arbeitsgruppe „Gaserzeugung aus Biomasse“ möchte sich an dieser Stelle beim Ministerium für die Unterstützung bedanken. Dieses Projekt war ein Kristallisationskern für die wissenschaftliche Beschäftigung mit diesem Thema; aus dem mühsamen Anfang entwickelt sich dieser Weg derzeit zu einem Leuchtturmprojekt des Forschungszentrums. Der Bau einer 500 kg/h Schnellpyrolyse ist bereits in einem fortgeschrittenen Planungsstadium, Anstrengungen für die Finanzierung zur Errichtung eines Flugstrom-Druck-Vergasers, sowie der Synthesegasreinigung und -nutzung vor Ort sind im Gange.

Projektteil I: „Systemanalytische Begleitforschung“

Die Arbeiten zur systemanalytischen Begleitforschung hatten das Ziel, das Vorhaben zur Gaserzeugung aus Stroh und Waldrestholz in sein technisches, ökonomisches und umweltrelevantes Umfeld einzuordnen und zu bewerten. Hierzu wurden die spezifischen Vorteile, aber auch die Nachteile des im Forschungszentrum Karlsruhe verfolgten Verfahrens – dargestellt für die Produktion von Fischer-Tropsch-Kraftstoffen – herausgearbeitet und mit konkurrierenden Alternativen verglichen. Als konkurrierende Verfahren für die Nutzung von Biomasse wurden einerseits die Wärme- und Stromgewinnung durch direkte Verbrennung in Biomasse-Heizwerken bzw. Biomasse(heiz)kraftwerken und die Co-Verbrennung in Steinkohlekraftwerken mit berücksichtigt; dies schloss die thermochemische Vergasung zur Stromerzeugung mit ein. Andererseits wurden die auf fossilen Energieträgern (Heizöl, Import-Steinkohle, Diesel) basierenden Alternativen der Wärme-, Strom- und Kraftstoffherzeugung dargestellt, die für Vergleiche hinsichtlich Subventionsbedarf, CO₂-Minderung bzw. CO₂-Minderungskosten unumgänglich sind.

Die vergleichende Gegenüberstellung und Bewertung der Verfahren zur Wärme-, Strom- und FT-Kraftstoffbereitstellung erfolgte vor allem anhand der Kenngrößen „Gestehungskosten“, „Subventionsbedarf“, „CO₂-Minderung“ bzw. „CO₂-Minderungskosten“ und mündet in der Ableitung einiger wesentlicher Schlussfolgerungen und Empfehlungen für dieses Themenfeld. Nachfolgend sind wesentliche Ergebnisse der Untersuchung kurz dargestellt.

In Baden-Württemberg steht derzeit ein Aufkommen von rund 8 Mio. Mg organische Trockensubstanz (oTS) pro Jahr an biogenen Rest- und Abfallstoffen für eine energetische Nutzung zur Verfügung; Stroh und Waldrestholz tragen mit 12 % bzw. 31 % wesentlich zu diesem Aufkommen bei. Zum Vergleich: In Deutschland liegt das Aufkommen bei rund 70 Mio. Mg oTS pro Jahr.

Mit Blick auf die energetische Nutzung von Stroh und Waldrestholz zur Produktion von Fischer-Tropsch Kraftstoff (FT-Kraftstoff) kann nach den derzeitigen Abschätzungen keine einheitliche ökonomische Präferenz für ein dezentrales oder für ein integriertes zweistufiges BTL-Konzept des Forschungszentrums getroffen werden. Für Stroh schneidet aufgrund der höheren Transportkosten (geringe Transportdichte der Strohballe) und des bereits hohen TS-Gehalts (86 % TS) das dezentrale Konzept ab einer Anlagengröße der zentrale Vergasungs-/Syntheseanlage von 4.000 MW_{Input} ökonomisch günstiger ab. Beim relativ feuchten Waldrestholz (50 % TS) stellt sich dagegen das integrierte Konzept ökonomisch vorteilhafter dar, da hier die Abwärme der zentralen Vergasungs- und Syntheseanlage kostengünstig zur Trocknung des Holzes eingesetzt werden kann.

Die ökonomischen Abschätzungen zeigen, dass FT-Kraftstoff aus Stroh und Waldrestholz zu Kosten von unter einem Euro pro Liter frei Anlage bereitgestellt werden könnte. Bei gemeinsamer Nutzung von Stroh und Waldrestholz ist der Verzicht auf die Mineralölsteuer bei einem Rohölpreis von mehr als 65 \$ pro barrel ausreichend, um diesen Wettbewerbsnachteil auszugleichen.

Die Biomassebereitstellung trägt – je nach Anlagengröße und Biomasseträger – 50-65 % zu den Kosten des FT-Kraftstoffs bei; folglich lassen sich hier über preiswerte Biomasseträger am schnellsten die Kosten reduzieren. Folglich lässt sich diese Technologie in Ländern mit kostengünstigen Biomasseträgern am schnellsten realisieren (wie z.B. in China).

Beim Vergleich mit der Wärme- und Stromgewinnung aus Stroh und Waldrestholz wird deutlich, dass diese Alternativen näher an der Wettbewerbsfähigkeit sind bzw. diese bereits erreicht haben. So zeigen die Ergebnisse, dass bereits heute die Wärmebereitstellung in der Regel nahezu ohne Subventionen auskommt (vgl. Abb. 2).

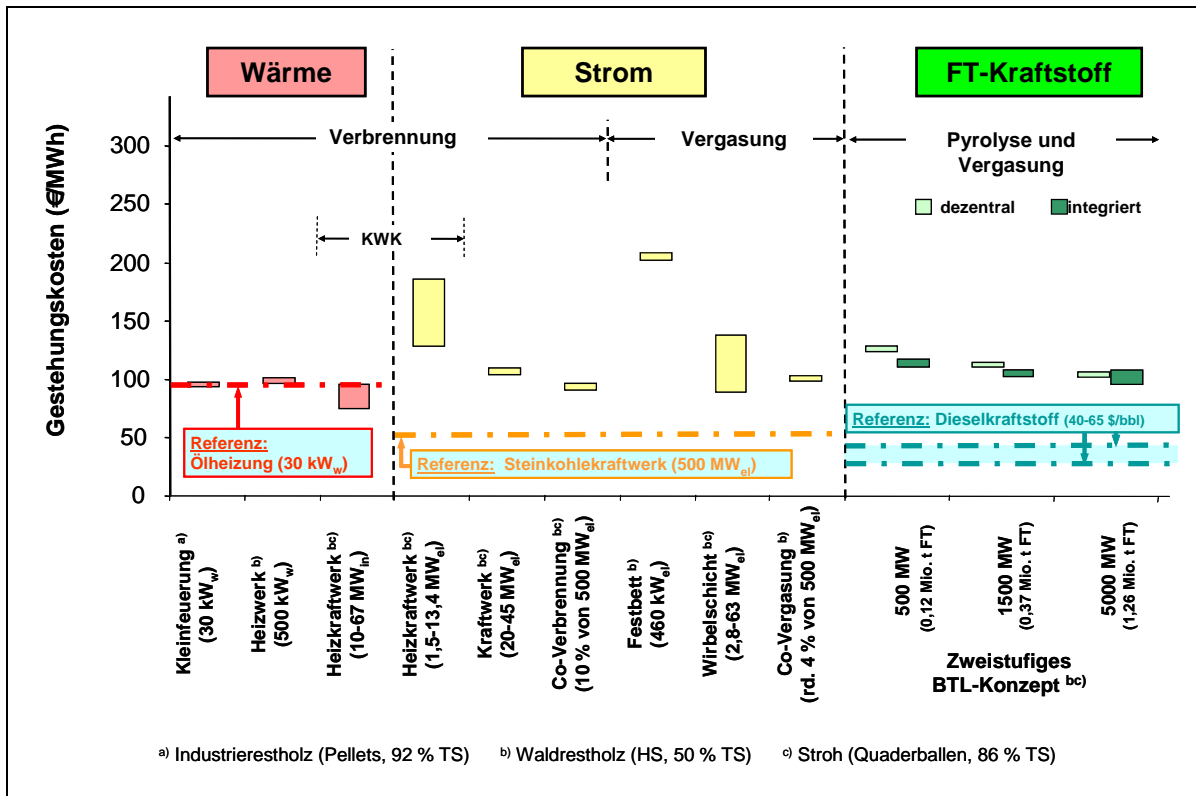


Abb. 2: Gestehungskosten für Wärme, Strom und FT-Kraftstoff aus Stroh und Waldrestholz

Mit der Substitution fossiler Energieträger durch erneuerbare können die bisherige CO₂-Emission und die Verstärkung des Treibhauseffekts reduziert werden. Bei den vom ITAS durchgeführten Analysen zur CO₂-Minderung wurden neben CO₂ auch die Treibhausgase CH₄ (Methan) und N₂O (Lachgas) einbezogen und in der Summe als CO₂-Äquivalente (CO₂-Äq.) dargestellt. Ausgehend von dem bestehenden Subventionsbedarf und der realisierten CO₂-Minderung resultieren bei der Produktion von FT-Kraftstoffen aus Stroh und Waldrestholz CO₂-Minderungskosten, die deutlich über 200 €/Mg CO₂-Äquivalent liegen. Bei der Verstromung liegen diese – mit Ausnahme der Festbettvergasung – unter 100 €/Mg CO₂-Äq. Am günstigsten lässt sich die CO₂-Minderung über die Wärmebereitstellung aus Biomasse realisieren – hier fallen nahezu keine bzw. sogar negative CO₂-Minderungskosten an.

Die Abschätzungen zu den CO₂-Minderungskosten verdeutlichen, dass die CO₂-Minderungsstrategie nur ein sehr schwaches Argument für die Forcierung der Aktivitäten zur Bereitstellung von FT-Kraftstoffen aus Biomasse darstellen kann. Da das BTL-Konzept des Forschungszentrums Karlsruhe über die Pyrolyse und Vergasung jedoch Wege eröffnet, die Biomasse – als Kohlenstoffträger – einer weitergehenden chemischen Nutzung zuzuführen, sollte dieser Entwicklungsweg weiter beschritten werden. Dies schließt eine gekoppelte chemisch/energetische Nutzung im Sinne des „Biorefinery“-Konzepts mit ein.

Projektteil II: „Schnellpyrolyse von Lignocellulose und Slurryherstellung aus Pyrolyseprodukten“

Die experimentellen Arbeiten zur Schnellpyrolyse hatten das Ziel, mit einem Lurgi-Ruhrgas (LR)-Mischreaktor erstmals Betriebserfahrungen mit zerkleinerter, trockener Lignocellulose wie Stroh oder Holz zu sammeln: (1) um die prinzipielle Eignung des LR-Mischreaktors für Biomasse zu prüfen, (2) um Auslegungsdaten für eine Pilotanlage zu ermitteln und (3) um weitere Verfahrensverbesserungen zu erproben. Dazu wurde im Forschungszentrum mit finanzieller Unterstützung aus diesem Projekt eine **Process Development Unit (PDU)** für einen Biomassedurchsatz von 3 bis 10 kg/h geplant, gebaut und in Betrieb genommen, siehe Verfahrensschema in Abb. 3.

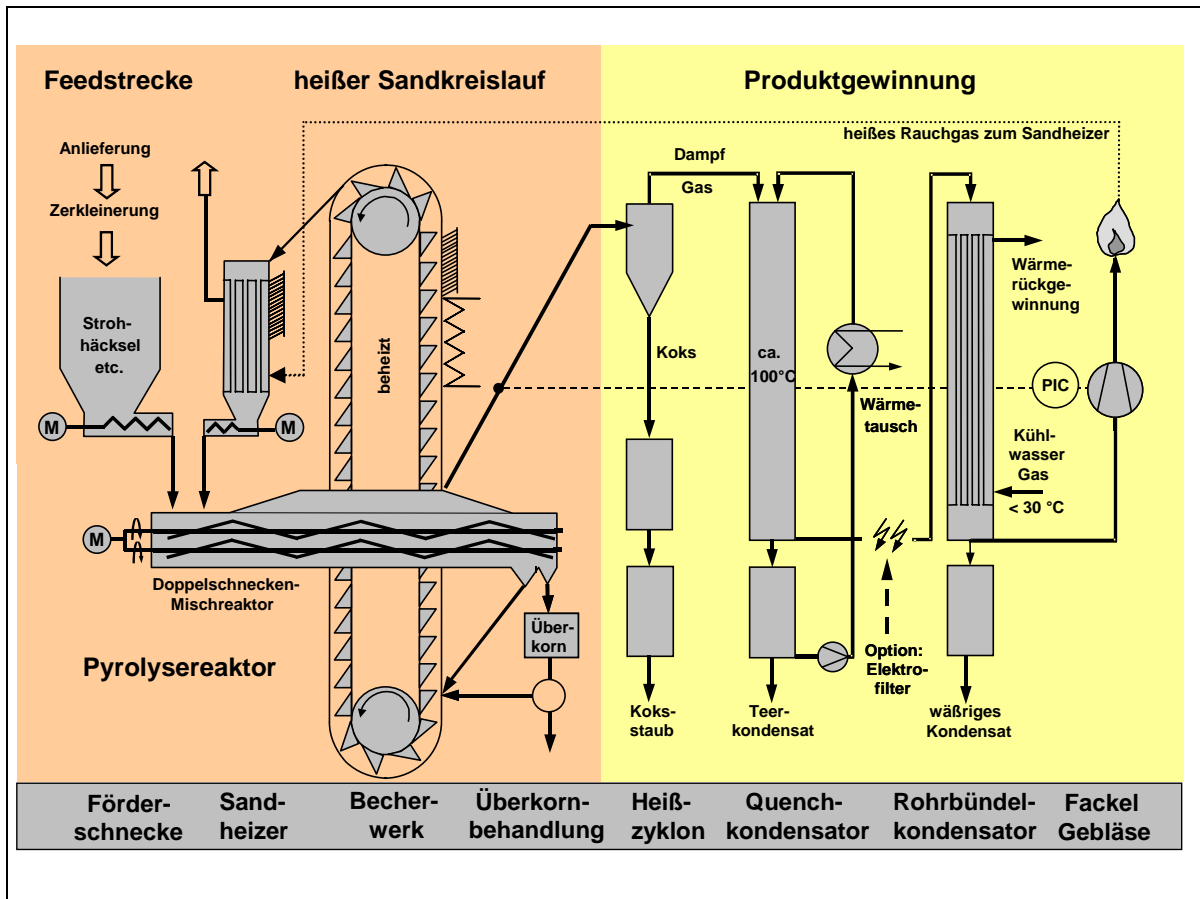


Abb. 3: Vereinfachtes Verfahrensfliessbild der Karlsruher Schnellpyrolyse PDU

LR-Mischreaktor: Firma Lurgi, Frankfurt, hat über 40 Jahre Erfahrungen aus anderen technischen Anwendungen des LR-Mischreaktors. Daher wurden parallel zu den Versuchen an der eigenen PDU auch Versuche mit Sägemehl und Stroh-häcksel an der 3-5 kg/h PDU der Firma Lurgi in Frankfurt gefahren. Dort wird der heiße Sand im Wärmeträgerkreislauf pneumatisch gefördert, in der eigenen Karlsruher PDU dagegen per Becherwerk. Die Versuchsergebnisse und Betriebserfahrungen aus beiden Anlagen (vgl. Tab. 1) zeigen, dass der LR-Mischreaktor für die Schnellpyrolyse von trockener Lignocellulose genau so gut geeignet ist wie die an anderen Stellen eingesetzten Reaktortypen.

Tab. 1: LR-Mischreaktor: Pyrolyseausbeuten bei Sägemehl und Strohhacksel

Gew. %	Koks	Kondensate	Gas
Holz sägemehl:	~ 15	60-70	~ 20
Getreidestroh hacksel:	20-30	50-55	20-25

Auch die Ausbeuten an Pyrolysekondensaten sind ähnlich hoch wie bei anderen Reaktortypen; mit dem LR-Mischreaktor lassen sich darüber hinaus die energetischen Vorteile einer mechanischen Fluidisierung nutzen. Unter Verwendung der vorliegenden Industrieerfahrungen kann die geplante Maßstabsvergrößerung des LR-Mischreaktors schneller und zuverlässiger realisiert werden.

Slurryherstellung: Zweck der Schnellpyrolyse ist es, aus den Pyrolysekoks und den Pyrolysekondensaten pumpbare Slurries bzw. lagerbare Pasten herzustellen, die zum einen deutlich kompakter als die ursprüngliche Biomasse sind und sich einfacher lagern und transportieren lassen; zum anderen können diese in einem Flugstrom-Druckvergaser einfach zerstäubt und mit reinem Sauerstoff vollständig zu einem praktisch teerfreien und methanarmen Rohsynthesegas umgesetzt werden. Die Erkenntnisse aus den Untersuchungen besagen, dass die Kondensatausbeute bei der Schnellpyrolyse etwa doppelt so groß sein muss wie die Koksausbeute, um die Pumpbarkeit der Slurries zu gewährleisten. Bei der Schnellpyrolyse von Holz wird ein Kondensat/Koks-Verhältnis von rd. 4 erreicht, bei Getreidestroh nur etwa 2. Im Gegensatz zu einer bisher angestrebten direkten Verwertung der Pyrolyseöle als Motor- und Turbinentreibstoff können die Qualitätsanforderungen für eine anschließende Slurryvergasung drastisch reduziert werden, was sich für Verfahrensvereinfachungen ausnutzen lässt. Es wurden verschiedene Methoden der Slurryherstellung untersucht und die physikalischen und chemischen Slurry-Eigenschaften bestimmt.

Betriebserfahrungen: Weich- und Hartholz-Sägemehl sowie Weizen- und Reisstrohhacksel mit 5-10 % Feuchte wurden mit einem < 10-fachen Überschuss von 500 °C heißem Sand im LR-Mischreaktor in wenigen Sekunden pyrolysiert. Weil bei einer anschließenden Vergasung Asche zur Bildung eines Schlackepelzes im Vergaser benötigt wird, sind auch stark mit Kokspartikel oder Sandabrieb verunreinigte Pyrolysekondensate als Einsatzstoff geeignet. Eine Reinigung kann hier entfallen, das Pyrolyseverfahren entsprechend vereinfacht und damit die Wirtschaftlichkeit verbessert werden.

Menge, Qualität und Stabilität eines Quenchkondensats aus der Schnellpyrolyse von aschereicher Lignocellulose wie Stroh oder Heu sind – verglichen mit Holz – relativ gering, so dass sich eine direkte Verwendung als Ersatz für Heizöl oder gar als Motor- oder Turbinenkraftstoff nicht lohnt. Das Kondensat enthält nur etwa die Hälfte der ursprünglichen Biomasseenergie, ist meist mit aschehaltigem Koks verunreinigt und trennt sich nach einer einstufigen Kondensation üblicherweise recht schnell in einen schweren Teer und eine leichte wässrige Phase auf. Im Gegensatz dazu sind auch schlechte Kondensatqualitäten zum Aufschlännen von Kokspulver für eine anschließende Slurry-Vergasung geeignet. Die minderwertige, aschereiche Biomasse lässt sich nur über eine Vergasung für eine hochwertige Verwertung erschließen.

Reisstroh lässt sich, trotz des verglichen mit unseren heimischen Getreidesorten deutlich höheren Aschegehalts, ebenso einfach pyrolysieren. Die Ausbeuten – bereinigt um den höheren Aschegehalt – entsprechen denen von Weizenstroh.

Die erfolgreichen Versuchskampagnen zur Slurry-Vergasung – bis in den 0,6 t/h-Maßstab – am Pilotvergaser der Firma FUTURE ENERGY in Freiberg sind nicht Gegenstand dieses Berichts. Die hervorragende Eignung des ausgewählten GSP-Vergasers (Gaskombinat Schwarze

Pumpe) für aschehaltige Pyrolyse-Slurries aus Biomasse wurde durch die Versuchskampagnen voll bestätigt.

Ausblick: Die weitere Verfahrensentwicklung erfolgt sowohl durch Anpassung, Umbau und Ergänzung der vorhandenen kleinen Versuchsanlage (PDU) als auch durch Errichtung einer Schnellpyrolyse-Pilotanlage für 0,5 t/h Durchsatz, für die derzeit Auslegungsdaten auf Basis der erzielten Versuchsergebnisse und der früheren Betriebserfahrungen der Firma LURGI ermittelt werden.

Die Untersuchungen zur Biomassevorbereitung, Schnellpyrolyse und Slurryherstellung sind ein Entwicklungsschwerpunkt im Rahmen des bereits skizzierten BTL-Gesamtkonzepts des Forschungszentrums (vgl. Abb. 1).

Projektteil III: „Gaserzeugung – numerische Simulationsarbeiten“

Die Vergasung von Biomasse eröffnet weitergehende Optionen zur Nutzung als Strom- oder Rohstofflieferant. Mit der Flugstromdruckvergasung kann diese thermochemische Energieumwandlung effizient durchgeführt werden. Vorteile dieses Verfahrens gegenüber anderen Vergasungsverfahren sind die Erzeugung eines fast teerfreien Synthesegases und die entfallende Nachverdichtung des unter Druck bereitstehenden Gases für ein nachfolgendes Syntheseverfahren.

Für die – aus ökonomischen Gründen – notwendigen großen Vergasereinheiten, die in der späteren Anwendung vorgesehen sind, fehlen bis jetzt jedoch Betriebserfahrungen. Daher ist die Entwicklung von entsprechenden Design- und Betriebstools für diese Vergaser notwendig.

In diesem Projektteil wurde für die Brennerdüse, ein Schlüsselement des Flugstromdruckvergasers, ein Entwicklungskonzept erstellt. Die durchgeführten Untersuchungen sind erste Schritte, um diesen Vergasertyp besser zu verstehen, berechenbar zu machen und damit eine dem Brennstoff angepasste Auslegung vornehmen zu können.

Ziel war der Aufbau eines Brennerprüfstands zur Untersuchung der Zerstäubungseigenschaften von Pyrolyseöl- und Kokksuspensionen. Begleitend wurde auch die Entwicklung eines numerischen Modells zur Vergasung von Slurries durchgeführt. Mithilfe dieses Modells können Temperatur- und Speziesverteilung im Reaktor sowie, mit einer erweiterten Datenbasis, wichtige Informationen zur Skalierung eines Vergasers gewonnen werden.

Zur systematischen Untersuchung der Zerstäubungsverhältnisse wurden die Stoffeigenschaften von Pyrolyseölen analysiert und ein in wichtigen Eigenschaften ähnlicher Modellbrennstoff (Ethylenglykol) für die Experimente eingesetzt. Da sich Slurries in ihren Zerstäubungseigenschaften bis zu einer Partikelgröße von ca. 50 µm nicht wesentlich von denen einer reinen Flüssigkeit unterscheiden und wesentlich größere Partikel sich im Vergaser ohnehin nicht mehr vollständig umsetzen, schien es gerechtfertigt, die Kaltversuche mit der reinen Modellflüssigkeit durchzuführen.

Mit diesen Versuchen zur Ermittlung der Zerstäubungseigenschaften von außen- und innenmischenden Düsen wurde das Engler-Bunte-Institut der Universität Karlsruhe beauftragt. Die Charakterisierung des Sprays erfolgte mit einem Phasen-Doppler-Anemometer. Aus den Ergebnissen dieser Versuchsreihen wurde eine neue, verbesserte, innenmischende Düse entwickelt. Ein Patentantrag für diese innovative Düse wurde eingereicht.

Die abschließenden Arbeiten bezogen sich auf die Optimierung der Düsengeometrie. Ebenso wurden Parameterstudien an der neuen Düse durchgeführt, um den Einfluss der Stoffeigenschaften und geometrischen Faktoren zu klären.

Die Inbetriebnahme der Vertikalbrennkammer am ITC-TAB des Forschungszentrums erfolgte im September 2004; Abb. 4 gibt hierzu das Anlagenschema wieder. Seit der Inbetriebnahme wurden Versuche mit der außenmischenden Düse durchgeführt. Hierbei wurden reines Ethylenglykol und Ethylenglykol / Koks-Mischungen mit einer mittleren Partikelgröße von 10 µm verwendet, ebenso wurde Pyrolyseöl aus Buchenholz (Buchenholzteer) eingesetzt.

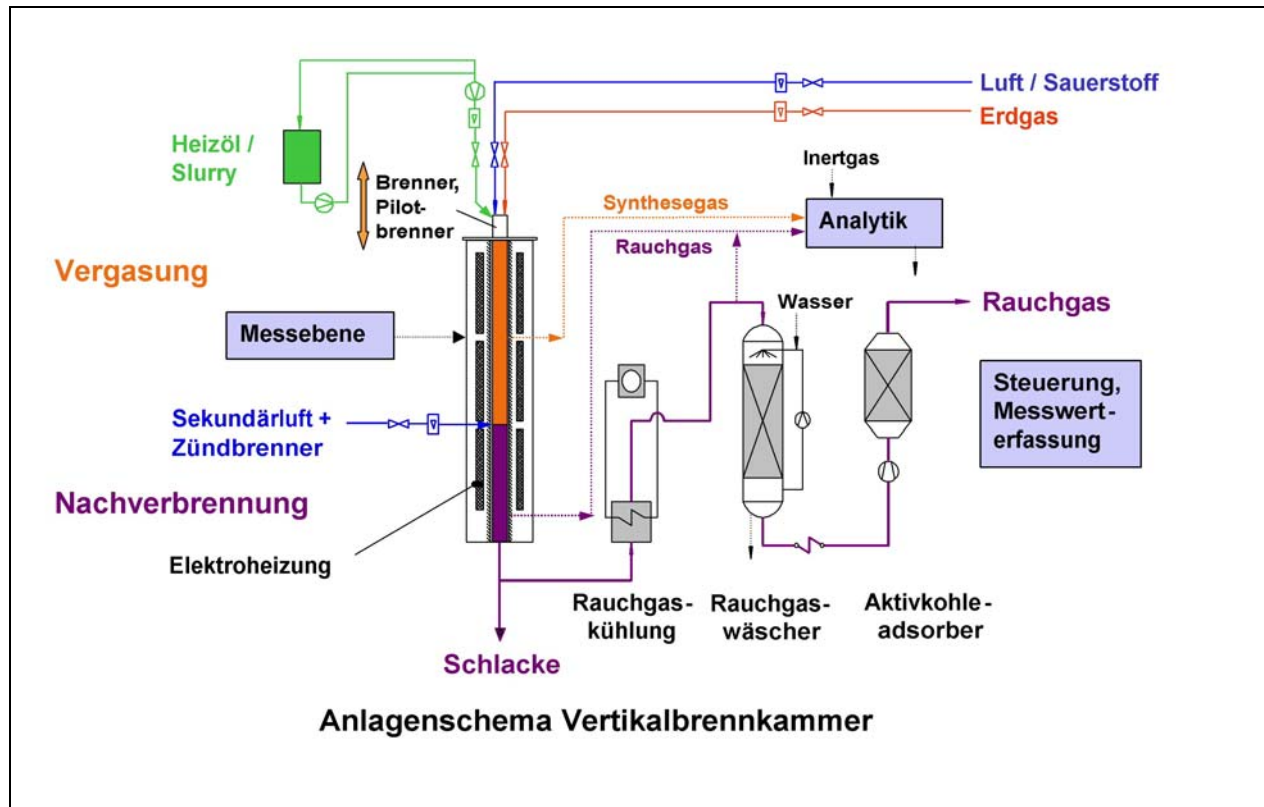


Abb. 4: Anlagenschema Vertikalbrennkammer

Für die Messung der Temperaturprofile kommt die 2-Perlen-Methode zum Einsatz. Diese erlaubt die Korrektur des Strahlungseinflusses der heißen Reaktorwand. Für die Konzentrationsprofile in der Vergasungszone wird eine ölgekühlte Abzugssonde eingesetzt. Hiermit ist ein isokinetischer Abzug möglich, ohne das Risiko einer Verstopfung wesentlich zu erhöhen. Die Geschwindigkeitsmessung erfolgt mit einem Laser-Doppler-Anemometer, das eine berührungslose Bestimmung des Geschwindigkeitsprofils über dem gesamten Reaktorquerschnitt erlaubt. Alle drei Messmethoden wurden erfolgreich eingesetzt und qualifiziert. Die Parametervariationen bei den Versuchen waren auf den gesamten Betriebsbereich eines atmosphärischen, technischen Vergasers abgestimmt und umfassten die Luftzahl, Wandtemperatur, den axialen Abstand zur Düse, Brennstoff, Partikelbeladung und -größe.

Das entwickelte numerische Modell in FLUENT erlaubt die Simulation eines partikelhaltigen Brennstoffs. Um den Rechenaufwand in Grenzen zu halten, wurde ein vereinfachtes kinetisches Modell entwickelt. Dieses wird mit den gefundenen experimentellen Daten abgeglichen und optimiert. Diese Arbeiten sind die Basis für weitere Verbesserungen des Modells und ermöglichen künftig die Auslegung bzw. Optimierung von großen Gaserzeugern.

Zur thermodynamischen Bilanzierung wurden Rechnungen mit Chemcad durchgeführt. Bei diesen Rechnungen zeigen sich die bei optimaler Zerstäubung im chemischen Gleichgewicht möglichen Grenzen des Vergasungsprozesses.