

# CombiFuel-Verfahren

AUF DER BASIS DER

**BRAUNKOHLNVERGASUNG**

MIT

**NULL-CO<sub>2</sub>-EMISSION**

# Entwicklung des CombiFuel – Verfahrens auf Basis der Braunkohlevergasung mit Null – CO<sub>2</sub> – Emission

N. Topf, Dr. G. Liebisch

VER Verfahrensingenieure Dresden

Kesselsdorfer Straße 216, 01169 Dresden

*Veröffentlicht im Rahmen der DGMK-Fachbereichstagung „Energetische Nutzung von Biomasse“ 19.-21. April 2004 in Velen/Westfalen*

## 1 Ausgangssituation / Zielstellung

Lebensqualität, Wirtschaftswachstum und globale Entwicklungstendenzen sind u.a. Ursache für den stets wachsenden Energiehunger der Menschen auf dem Planeten Erde, verbunden mit einer steigenden CO<sub>2</sub> - Emission und dem rasanten Verbrauch der natürlichen Energieressourcen, welche über Jahrmilliarden bei der Erdentwicklung entstanden sind.

Daher ist u.a. der Ausbau der Nutzung regenerativer Energien wie Wind, Wasser, Solar, Geothermie und Biomasse zur Deckung des Energiebedarfes in Deutschland, Europa und der ganzen Welt entsprechend des verfügbaren Potentials, verbunden mit einer globalen Verminderung der CO<sub>2</sub> - Emission das Gebot des 21. Jahrhunderts.

Hauptbereiche des Energieverbrauches sind heute u.a. Industrie, Gewerbe, Haushalte und Verkehr.

Beispielsweise trägt der Autoverkehr in starkem Maße zu einer höheren Umweltbelastung durch die Verbrennung von mineralölstämmigen Kraftstoffen bei. Aus diesem Grund wird von der Automobilindustrie der Weg verfolgt, den schrittweisen Übergang von heutigen Antriebstechniken und konventionellen Kraftstoffen zu Zukunftsantriebssystemen, wie z.B. Brennstoffzellensystemen mit Elektromotor und den dafür benötigten Kraftstoffen zu realisieren.

Um dem Ziel des Einsatzes regenerativer Energien zur Herstellung von Biokraftstoffen oder idealerweise von Wasserstoff als Energiequelle gerecht zu werden, ist der erste Ansatzpunkt die Nutzung von Biomasse.

Der Bedarf an Vergaser- und Dieselkraftstoff beträgt heute ca. 55 Mio. t/a [1, 2]. Die energieäquivalente Menge an lufttrockenem Holz (18% Wassergehalt) beträgt somit ca. 155 Mio. t/a. Nimmt man bei der heute bekannten Technologie der Herstellung von Kraftstoff aus Holz eine Energieausbeute von 30 % an, würde der Bedarf an Holz allein zur Substitution des Kraftstoffverbrauchs 510 Mio. t/a lufttrockenes Holz betragen. Das entspricht einem Volumen von ca. 2.000 Millionen Kubikmeter Frischholz.

Recherchen haben ergeben, dass in Deutschland jährlich ca. 60 Mio. Kubikmeter Frischholz nachwachsen, davon werden 40 Millionen Kubikmeter der stofflichen Nutzung zugeführt [3]. Für die energetische Nutzung verbleiben somit 20 Mio. m<sup>3</sup>/a.

Des weiteren stünden der Anbau von Energiepflanzen als Quelle zur Verfügung.

Dabei muss beachtet werden, dass ein Ertrag ca. 12 Tonnen Biomasse lufttrocken pro Hektar und Jahr erzielt werden kann. Bei einer sicherlich zu hoch veranschlagten Nutzfläche für Energiepflanzen von 1 Mio. Hektar in Deutschland entspricht das etwa 70 Mio. Kubikmeter Frischholz pro Jahr [19]. Rechnet man das Waldrestholz und das theoretische Potential an Energieplantagenholz zusammen, so könnte dies mit-

tel- bis langfristig einen Anteil von etwa 5 % allein des Treibstoffbedarf decken. Von einem gesamten Primärenergieverbrauch in Deutschland von 488 Mio. t SKE (im Jahr 2002) [1], entsprechend 3.900 Mio. m<sup>3</sup> Frischholz, könnten durch das insgesamt verfügbare Potential an Biomasse (Waldrest- und Plantagenholz) ca. 2,5 % gedeckt werden.

Dieser Überlegung folgend muss neben der Biomasse nach einem über lange Zeit verfügbaren Rohstoffpotential gesucht werden, um die Ablösung z.B. des Mineralöls als allgemeine Quelle für die Herstellung von Kraftstoffen zu ermöglichen. Ein in Deutschland zur Verfügung stehender Primärenergieträger ist Braunkohle. Derzeit werden jährlich ca. 180 Mio. Tonnen Braunkohle hauptsächlich für den Betrieb von Kraftwerken gefördert. Prognosen sagen, dass die Ressourcen an Braunkohle noch ca. 230 Jahre ausreichen [4]. Für die Umsetzung des Vorhabens der Methanolherstellung im Mobilitätsbereich auf Basis von Braunkohle benötigt man ca. 150 Mio. Tonnen Rohbraunkohle jährlich und 48 GW Elektroenergie. Das bedeutet, dass die Kapazitäten an Braunkohle für die Stromproduktion sowie eine mögliche synthetische Kraftstoffherstellung oder idealerweise von Wasserstoff als Energiequelle für die Mobilitäts-erhaltung in Deutschland dann noch für ca. 150 Jahre gesichert ist.

**Zielstellung** des in diesem Vortrag vorgestellten Verfahrenskonzeptes ist die Vorbereitung der Entwicklung einer Produktionstechnologie zur Erzeugung von großen Mengen von Energiemethanol als einen günstigen Speicher für Wasserstoff für die Schaffung einer möglichen Basis zum Aufbau einer Wasserstoff geführten Energie- und Rohstoffwirtschaft für z.B. heutige und zukünftige Verbraucher im Bereich des Verkehrswesens und dies auf der Basis einer Kombination von Braunkohletrocknung, -vergasung und -verbrennung mit einer verfahrensbedingten Null-CO<sub>2</sub>-Emission.

Für den Betrieb der Anlage zur Methanolerzeugung auf Basis der Braunkohlevergasung wird Elektroenergie benötigt. Diese Elektroenergie muss immer zur Verfügung stehen. Der größte Verbraucher in diesem Verfahrenskonzept ist eine Wasserstoff-erzeugung durch Elektrolyse. Der Bedarf hierfür beträgt 4,5 kWh/m<sup>3</sup> Wasserstoff [5].

Energiekonzerne sind gesetzlich verpflichtet, Strom welcher u.a. aus regenerativen Energiequellen erzeugt wird abzunehmen. Das bedeutet, dass Großkraftwerke in einem solchem Fall ihre eigene Stromproduktion drosseln.

Durch einen Stromabnehmer wie z.B. einer CombiFuel-Anlage / Wasserstoff-erzeuger ist immer ein bestimmter Bedarf an Elektroenergie vorhanden, so dass ein Zurückfahren der elektrischen Leistung des Kraftwerkes entfällt.

Ein weiteres Ziel des Verfahrenskonzeptes ist daher die Schaffung eines möglichen Stoff- und Energiewandlungsprozesses zur Speicherung von Elektroenergie in sehr großen Mengen zu niedrigsten Kosten, Schaffung eines „Gigawattspeichers“.

Ein derartiger Speicher wird gerade angesichts des stetigen Wachstums der Nutzung von regenerativer Energie wie Wind- und Solarstrom verbunden mit einer zunehmenden Netzin- stabilität durch die spontane Energieeinspeisung von z.B. Windstrom dringend benötigt.

**Fazit:** Die Strategie des CombiFuel-Verfahrens ist darauf gerichtet, ein Verfahren zu schaffen, das verfahrensbedingt keine CO<sub>2</sub>-Emissionen verursacht, Energiemethanol als günstiges Speichermedium für Wasserstoff z.B. für die Mobilitätserhaltung liefert und eine energiewirtschaftliche Basis für heutige und zukünftige Verbraucher auf Basis einer Wasserstoffwirtschaft bietet. Grundlage ist die Kombination von Braunkohle als Kohlenstoffträger und Elektroenergie nichtfossilen Ursprungs zur Herstellung von im Verfahren benötigtem Sauerstoff und Wasserstoff. Das Resultat ist ein Speicher für Elektroenergie im „Gigawattbereich“.

Darüber hinaus sei erwähnt, dass eine derartige Entwicklung in Deutschland eine nationale Vision für die nahe Zukunft ermöglicht. Dies ist verbunden mit der Schaffung von vielen Arbeitsplätzen in Deutschland, einer Unabhängigmachung von Öl, deren weltweite Verteilung zur weiteren Verschärfung von Krisen auf diesem Planeten in den nächsten Jahrzehnten führen kann.

## **2 Kurzdarstellung des Projektes**

Ausgangsstoff für die hier zu betrachtende Methanolherstellung ist Rohbraunkohle und Elektroenergie.

Da die Rohbraunkohle auf Grund ihres hohen Wassergehaltes einen zu geringen Energieinhalt (Heizwert) besitzt, ist als erste Stufe eine Trocknung erforderlich. Als Trocknungsverfahren wird die Dampf-Wirbelschicht-Trocknung gewählt, bei dem die mechanisch aufbereitete Rohbraunkohle in einer Dampfatmosfera bei indirekter Wärmezuführung getrocknet wird. Dieses Trocknungsverfahren wird deshalb gewählt, weil dabei der bei anderen Trocknungsverfahren entstehende Brüden (Wasserdampf-Luft-Gemisch) vermieden wird (Eigeninertisierung), das verdampfte Kohlenwasser wieder kondensiert wird und das Verfahren sich für sehr große Schüttgut-mengen durch eine effizienten Wärme- und Stofftransport (kompakte Bauform) auszeichnet.

Der nächste Verfahrensschritt ist die Vergasung der Trockenbraunkohle. Als Vergasungsverfahren bietet sich hier die Wirbelschichtvergasung an, da die Kohle aus der Wirbelschichttrocknung bereits für die Wirbelschichttechnologie aufbereitet vorliegt. Als Vergasungsmittel wird reiner Sauerstoff, das Restgas (Purgegas) aus der Methanolsynthese und das Oxidationsgas der zweiten Stufe (Verbrennung) eingesetzt, um letztlich ein stickstofffreies Synthesegas zu erhalten. Der Sauerstoff stammt aus der Wasserelektrolyse, was neben dem im späteren Verfahrensverlauf noch einzusetzenden Wasserstoff die verfahrensbedingt notwendige Zusatzenergie darstellt.

Die Asche bzw. der aus dem Rohgas abgeschiedene Staub aus der ersten Vergasungsstufe ist nicht deponiefähig, nicht allein wegen des möglicherweise zu hohen Kohlenstoffgehaltes, sondern insbesondere wegen des aus den Aschebestandteilen sich bildenden Calciumsulfides. Aus Letzterem entsteht bei der Einwirkung von Wasser Schwefelwasserstoff, was eine Deponierung unmöglich macht. Ein nachfolgender Oxydationsprozess zur Oxydation des Calciumsulfids zu dem harmlosen Calciumsulfat ist deshalb erforderlich. Es bietet sich daher an, die Vergasung nur bis auf einen gewissen Restkohlenstoffgehalt zu treiben und den Rückstand in einer nachgeschalteten Verbrennung, möglich ist eine stationäre oder besser eine zirkulierende Wirbelschichtverbrennung, vollständig auszubrennen. Als Oxidationsmittel wird in der zweiten Stufe (Verbrennung) ebenfalls reiner Sauerstoff eingesetzt. In diesem Prozess wird der für die indirekte Beheizung der DampfWirbelschichttrocknung erforderliche Heißdampf erzeugt. Die resultierende Asche ist deponiefähig.

Die entstehenden Oxidationsgase (CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, ...) werden als Vergasungsmittel in die Wirbelschichtvergasung Stufe 1 zurück geführt. Dadurch entsteht ein Verfahren, welches keine Emissionen in die Atmosphäre freisetzt - daher CO<sub>2</sub> - frei.

Das aus der Gaserzeugung kommende Rohgas wird gekühlt und entsprechend den Anforderungen des Katalysators der nachfolgenden Methanolsynthese gereinigt. Nach Zusatz des Wasserstoffs aus der Wasserelektrolyse zur Einstellung des erforderlichen H<sub>2</sub>/CO - Verhältnisses von etwas über 2 wird das Gas verdichtet und der Methanolsynthese zugeführt.

Das Restgas aus der Methanolsynthese kann unter Beachtung des Inertgasanteils (Stickstoff) der Gaserzeugung (Kohlevergasung Stufe 1) zugeführt werden.

Im Ergebnis der durchgeführten Variantenberechnungen wurde als die günstigste Variante die Variante mit direkter Wärmeauskopplung aus der Vergasung und Restgasrückführung aus der Synthese und damit einem vollständigen Kohlenstoffumsatz im Gesamtverfahren herausgearbeitet.

## 2.1 Berechnungen zur Aufstellung der Masse - und Energiebilanz

### 2.1.1 Trocknung der Rohbraunkohle

Im Folgenden sind die wichtigsten Ausgangsdaten und Ergebnisse der Bilanzierung als Beispielrechnung für eine Anlage mit einer Baugröße von 290 t/h dargestellt.

Parameter	Zahlenwert	Dimension
Massestrom Rohbraunkohle	290	t/h
Ausgangswassergehalt	58	Ma.-%
Zielwassergehalt	12	Ma.-%
Massestrom Trockenbraunkohle	138	t/h
Massestrom Abdampfkondensat	152	t/h
Heizwert Rohbraunkohle	9.579	kJ/kg
Heizwert Trockenbraunkohle	20.088	kJ/kg
Massestrom Heißdampf	224	t/h
Heißdampfdruck	20	bar absolut
Kondensatunterkühlung	10	K
Trocknungstemperatur	105	°C
Massestrom Kühlwasser zur Abdampfkondensation	5.489 (25/40)	t/h (°C)
Massestrom Kühlwasser zur Abdampfkondensatkühlung	605 (25/40)	t/h (°C)

Das Speisewasser für den Dampferzeuger wird mittels der fühlbaren Wärme des Synthesegases aus der Vergasung auf 212°C vorgewärmt. Die Verdampfung erfolgt im Dampferzeuger durch die Oxidationsgase aus der Kohlenstoffverbrennung. Die Temperatur des Oxidationsgases wird hierbei von 800 auf 400°C abgesenkt.

### 2.1.2 Elektrolytische Gaserzeugung

Anhand des Wasserstoffbedarfs für die Methanolsynthese und den Sauerstoffbedarf für die Vergasung ergibt sich die Massebilanz um die Wasserelektrolyse.

Parameter	Zahlenwert	Dimension
Massestrom Wasser	116	t/h
Massestrom Wasserstoff für Methanolsynthese	13	t/h
Massestrom Sauerstoff für Vergasung	87	t/h
Massestrom Sauerstoff Überschuss	16	t/h
Elektroenergiebedarf	651	MW

### 2.1.3 Zweistufige Vergasung/Verbrennung und Gasaufbereitung

Im Folgenden sind die wichtigsten Ausgangsdaten und Ergebnisse der Bilanzierung zusammengefasst.

Parameter	Zahlenwert	Dimension
Massestrom Trockenbraunkohle	138	t/h
Heizwert Trockenbraunkohle	20.088	kJ/kg
Massestrom Vergasungsmittel (Sauerstoff)	87	t/h
Massestrom Restgas – und Oxidationsgasrückführung	372	t/h
Massestrom Vergasungsgas	225	t/h
Gastemperatur nach Vergasung	710	°C
Gastemperatur nach Speisewasservorwärmung	300	°C
Gastemperatur nach Wäsche und Kühlung	30	°C
Massestrom Waschwasser	177	t/h
Massestrom Kühlwasser zur direkten Gaskühlung	30	t/h
Massestrom Kühlwasser zur indirekten Gaskühlung	1.263 (25/40)	t/h (°C)

## Gasparameter des Synthesegases

Komponente	Vol.-%	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	$H_u$ kJ/m <sup>3</sup> i.N.	$c_p$ kJ/m <sup>3</sup> K	Vol.-%	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	$H_u$ kJ/m <sup>3</sup> i.N.	$c_p$ kJ/m <sup>3</sup> K
$t = 710^\circ\text{C}$					$t = 30^\circ\text{C}$			
CO <sub>2</sub>	14,73	0,31	9.575	1,48	15,19	0,95	9.876	1,36
CO	45,18				46,60			
H <sub>2</sub>	31,85				32,85			
H <sub>2</sub> O	7,06				4,14			
CH <sub>4</sub>	1,15				1,19			
N <sub>2</sub>	0,03				0,03			

### 2.1.4 Methanolsynthese

Für die weiteren Berechnungen, insbesondere die Methanolsynthese, werden die Gasparameter bei 30°C herangezogen.

Parameter	Zahlenwert	Dimension
Volumenstrom Synthesegas	230.868	m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom CO (aus Vergasung)	107.595	m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom H <sub>2</sub> (aus Vergasung)	75.837	m <sup>3</sup> /h
H <sub>2</sub> / CO – Verhältnis (erforderlich)	2,05	
Zusätzlicher H <sub>2</sub> – Bedarf	144.733	m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom Sauerstoff bei Elektrolyse	72.367	m <sup>3</sup> /h
Sauerstoffbedarf für zweistufige Vergasung	60.923	m <sup>3</sup> /h
Elektroenergiebedarf für die Elektrolyse	4,5	kWh/m <sup>3</sup> H <sub>2</sub>

## 2.1.5 Zusammenfassung

Parameter	Zahlenwert	Dimension
Massestrom Rohbraunkohle	290	t/h
Massestrom Methanol	182	t/h
Massestrom Sauerstoffüberschuss	16	t/h
Massestrom Wasserüberschuss	36	t/h
Massestrom Kondensat bei Gasabkühlung	6	t/h
Massestrom Abwasser	40	t/h
Massestrom Asche	10	t/h
Elektroenergiebedarf	651	MW
Heizwert Methanol	19.525	kJ/kg
Energieerzeugung in Form der chemisch gebundenen Wärme im Methanol	987	MW
<u>Energieerzeugung (Methanol)</u> Elektroenergieeinsatz	152 (*)	%
<u>Energieerzeugung (Methanol)</u> (Elektroenergieeinsatz + Rohbraunkohle)	69 (*)	%

(\*) Der energetischen Prozesswirkungsgrad wurde ohne Berücksichtigung des Eigenenergieverbrauches für elektrische Antriebe der Gesamtanlage ermittelt.

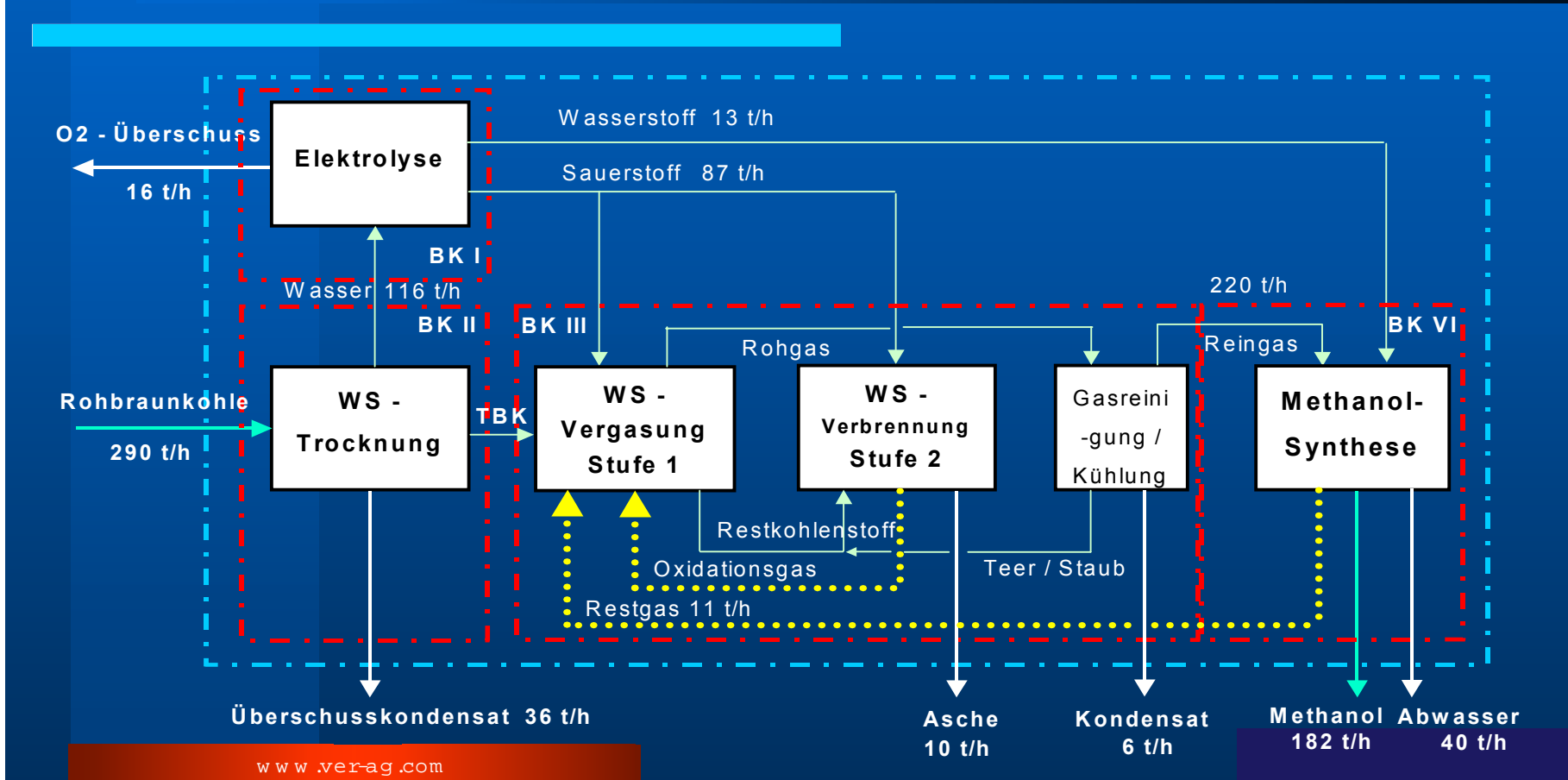
Der Eigenenergiebedarf für diesen Prozess wird mit 8% vom Gesamtbedarf eingeschätzt und bei der nachfolgenden Wirtschaftlichkeitsbetrachtung als Pelt 2 berücksichtigt.

## 2.2 Bilanzschema

In den Anlagen 1 und 2 ist die Masse - und Energiebilanz in einem Blockfließbild für das Gesamtverfahren dargestellt.



# Blockschaltbild / Massebilanz des CombiFuel-Verfahrens



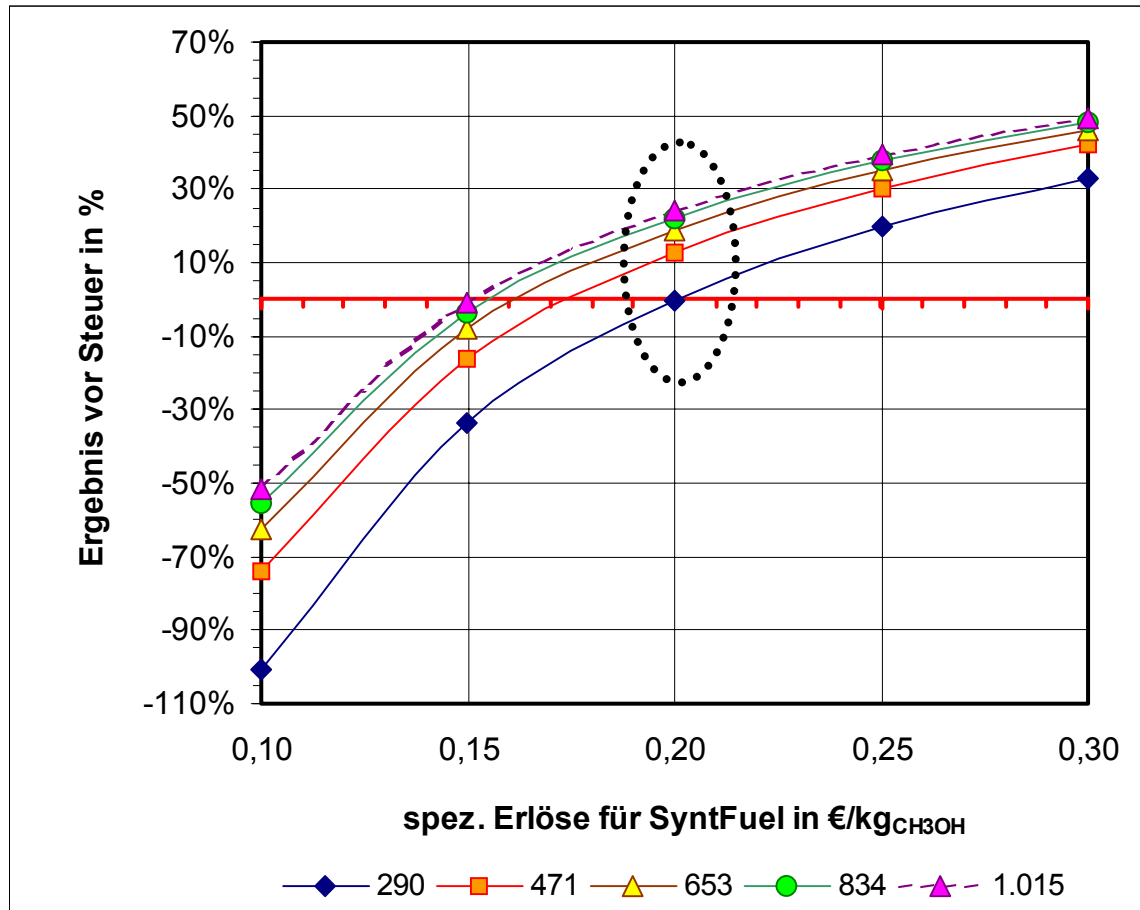


### 3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

In Anlage 3 ist nachfolgend aufgeführte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung grafisch dargestellt.

			spez. K / E	Basisvariante
<b>Input</b>				<b>1,00</b>
	mRBK	t/h		290
	Pelt 1	MW		651
	Pelt 2	MW		49
	kRBK	€/t	<b>15</b>	4.350 €
	kPelt	€/MW	<b>20</b>	14.000 €
<b>Output</b>	mH2O	t/h		82,00
	mAsche	t/h		10,00
	mO2	t/h		16,00
	kH2O	€/t	10	820 €
	kAsche	€/t	100	1.000 €
	kO2	€/t	0	- €
<b>Summe Kosten 1</b>				<b>20.170 €</b>
<b>Output</b>	mCH3OH	t/h		182,4
	eCH3OH	€/kg	0,15	27.360 €
			0,20	36.480 €
			0,25	45.600 €
<b>Betriebsstunden</b>		<b>h/a</b>	<b>8000</b>	
				<b>1,00</b>
Investkosten		€		800.000.000
Afa		a	20	40.000.000
Zinsen		%	5,5	44.000.000
Instandhaltung		% von Inv.-K.	3	24.000.000
Versicherung		% von Inv.-K	1	8.000.000
Personal		VBE		100
	kPersonal	€/a	50000	5.000.000
Veraltung		% von P.-K	10	500.000
sonstige Fremdleistungen		€		10.000.000
<b>Summe Kosten 2</b>				<b>16.438 €</b>
<b>Summe = (Erlöse minus Kosten 1 u. 2)</b>			mRBK	290
			0,15	-33,80%
			0,20	-0,35%
			0,25	19,72%

## Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnung - Variation des Rohbraunkohlemassestromes zwischen 290 und 1.015 t/h



## Output an Methanol

Methanol- produktion	Ergebnis v. Steuer
182 t/h	- 0 %
296 t/h	13 %
410 t/h	19 %
524 t/h	22 %
638 t/h	24 %

Den oben gemachten Angaben, bezogen auf das Ergebnis vor Steuer, unterliegt einem spez. Erlös von 20 Cent/kg CH<sub>3</sub>OH.

#### 4 Anlagen

- Anlage 1: Massebilanz Gesamtprozess  
Anlage 2: Energiebilanz Gesamtprozess  
Anlage 3: Diagramm zur Wirtschaftlichkeitsberechnung

#### 5 Literatur

- [1] Jahresbericht der MWV 2002  
[2] Mineralölwirtschaft e.V., Mineralöl – Zahlen, [www.mwv.de](http://www.mwv.de)  
[3] Wirtschaftswoche, Nr. 26, Der Wald in Zahlen, 19.06.2003  
[4] Bundesverband Braunkohle, Braunkohle, Ein Industriezweig stellt sich vor, DEBRIV, [www.braunkohle.de](http://www.braunkohle.de)  
[5] [www.ht - hydrotechnik.de](http://www.ht-hydrotechnik.de)  
[6] Asinger, Friedrich, Prof. Dr. techn. Dr. phil. habil.: Methanol - Chemie - und Energierohstoff, Die Mobilisation der Kohle, Akademie - Verlag Berlin, 1987  
[7] Firmenunterlage RASCHIG GMBH  
[8] Wirtschaftswoche, Nr. 31, Baggern statt Bohren, 24.07.2003  
[9] Verband der Automobilindustrie, Auto Jahresbericht 2003, Frankfurt am Main, [www.vda.de](http://www.vda.de)  
[10] ADAC e.V, Mobilität im Jahr 2020, Artikel – Nr. 283112.1, München 2003  
[11] AGEB, Auswertungstabellen zur Energiebilanz für die BRD 1990 bis 2001, Stand 09/02  
[12] Shell in Deutschland NEWS, Ausblick auf ein neues Kraftstoffzeitalter, 06/05/2003  
[13] Schumann, Ingo, u.a., Rheinbraun AG, 6. Aachener – Symposium, Fuzzy Logic Regelung einer kommerziellen Kohlevergasungsanlage, 11/96  
[14] Neue Züricher Zeitung, Forschung – Technik, Fossile Kraftwerke ohne CO<sub>2</sub> - Emissionen, 06.08.2003  
[15] US – Energiebehörde, Neue Technologie kostet eine Milliarde Dollar und emittiert angeblich kein CO<sub>2</sub>, [www.nytimes.com](http://www.nytimes.com)  
[16] BWK, Nr. 7/8, Der deutsche Kraftwerkspark, 2003  
[17] BMVBW, Zwischenbericht 2001, Kraftstoff der Zukunft, [www.bwv.de](http://www.bwv.de)  
[18] BP, Statistical review of world energy, Juni 2002, [www.kohlenstatistik.de](http://www.kohlenstatistik.de)  
[19] C. Neumeister, 02/ 2004, [www.agrobransle.se](http://www.agrobransle.se)