

DER **“COMBIPOWER-PROZESS“**

EINE

MÖGLICHKEIT DER DEZENTRALEN
ERZEUGUNG VON

STROM, WÄRME UND INDUSTRIEGAS
AUS **BIOMASSE**

INNOVATIONSFORUM IN FREIBERG

02.-03. NOVEMBER 2006



www.ver-gmbh.com

Titel: Das “CombiPower-Verfahren“ eine Möglichkeit der dezentralen Erzeugung von Strom, Wärme und Industriegas aus Kohle und Biomasse

Autoren: Norbert Topf, Madeleine Berger, Gert Palitzsch, Dr.-Ing. Sascha Schröder
VER Verfahrensingenieure GmbH, Breitscheidstraße 78, 01237 Dresden
ver-gmbh@t-online.de

Inhalt:

1	Einleitung.....	2
2	Der CombiPower-Prozess	3
2.1	Anlagentechnik	4
2.2	Prozessparameter.....	7
2.2.1	Eingangsmedien	7
2.2.2	Ausgangsmedien ¹⁾	8
2.3	Prozessparametervariation	8
3	Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen.....	12
4	Zusammenfassung	19
5	Referenzen.....	19

1 Einleitung

Die Auswirkungen der Globalisierung und des Wachstums der Wirtschaft zeigen sich heute in allen Bereichen des täglichen Lebens. Auch in der Öffentlichkeit werden zunehmend die Fragen einer zukünftigen verantwortungsbewussten Nutzung begrenzter Ressourcen diskutiert und in gleichem Kontext die mit den sichtbaren Emissionen von Luftschadstoffen aufgeworfenen Fragen nach dem saubersten Energieträger thematisiert.

In diesem Zusammenhang erhält nicht nur die verstärkte Nutzung so genannter grüner Energie, wie Wind, Fotovoltaik, Biomasse oder Erdwärme, eine größere Aufmerksamkeit, es werden vor gleichem Hintergrund auch die jeweiligen Potenziale einer Energieressource, deren Verfügbarkeit und deren Reichweite bewertet.

Die Ressource „Öl“ stellt dabei weltweit die Leitwährung für den Markt von Energieträgern dar [1]. Öl ist heute gleichermaßen ein wirtschaftlicher und politischer Einflussfaktor mit erheblichem Hebel. Wer für diese Ware „Öl“ die Preisentwicklungen der letzten drei Jahre vor Augen hat, dem wird der Preisanstieg von ca. 30 US \$/Barrel auf heute fast 80 US \$/Barrel nicht entgangen sein. Entgegen der vielfach verbreiteten Meinung ist dieser Preisanstieg jedoch nicht allein mit politischen Krisen zu begründen. Er ist auch logische Konsequenz einer zunehmend schnell wachsenden globalen Wirtschaft und Nachfrage nach Energie.

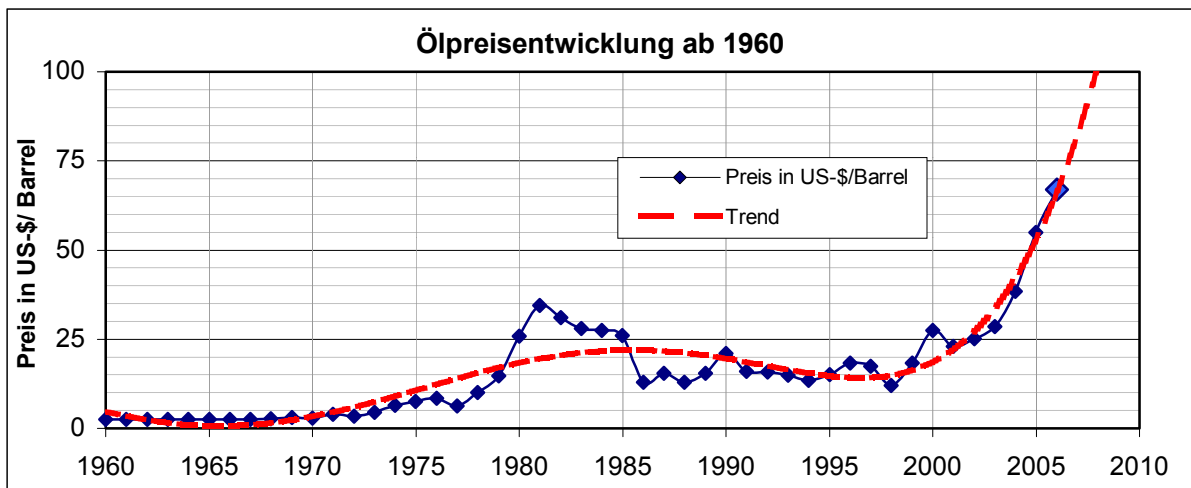


Diagramm 1: Ölpreisentwicklung von 1960-2006

Allein in China wurden in den letzten 3 ½ Jahren rund 20 Mio. Autos produziert und neu zugelassen. Dies entspricht in etwa der Hälfte des Fahrzeugbestandes der Bundesrepublik Deutschland und vermittelt nur einen groben Anhaltspunkt für eine Prognose des zukünftig weiter zunehmenden Energiebedarfs allein dieser aufstrebenden Wirtschaftsregion.

Konsequenz der weltweit stark ansteigenden Nachfrage nach Öl und Energie sind Preiserhöhungen in allen Bereichen der Energiewirtschaft.

Daher ist ein Gebot der Stunde, neue Ideen zu einer regionalen effizienten Energiegewinnung auf der Basis einheimischer Ressourcen zu entwickeln und umzusetzen. Hierin liegt nicht nur ein Wagnis, sondern in erster Linie auch eine Chance.

Vor allem der Blick auf die gewinnbaren, einheimischen Kohlereserven und das stoffliche und technische Entwicklungspotenzial regenerativer Energiequellen, eröffnet zahlreiche Ansatzpunkte, langfristig die Abhängigkeit von Energieimporten zu verringern, Wertschöpfungsketten im Land zu generieren und damit Arbeitsplätze zu schaffen und zu erhalten.

Der im Folgenden beschriebene Prozess bietet Interessenten eine gute Möglichkeit sich erfolgreich und zukunftsorientiert bei der Gewinnung von sauberer Energie auf der Grundlage inländischer Ressourcen zu engagieren.

2 Der CombiPower-Prozess

Der CombiPower-Prozess dient der dezentralen Gewinnung von Strom und Wärme aus festen Brennstoffen mit Luft als Vergasungsmittel. Beispielhaft genannt sei hier der Einsatz von Biomasse, Braunkohle oder aufbereitetem Hausmüll (EBS).

Abbildung 1 zeigt das Fließbild des CombiPower-Verfahrens.

Aufbauend auf diesem Konzept bietet der CombiPower-Plus-Prozess durch Einsatz sauerstoffangereicherter Luft als Vergasungsmittel zusätzlich die Möglichkeit neben Strom und Wärme auch Industriegas zu erzeugen. Hierzu wird der bestehende Anlagenkern lediglich um eine Sauerstoffanreicherung mittels Druckwechsel-Adsorptions-Anlage erweitert.

Beispielhaft ausgehend von einer Anlagenkapazität mit einem Einsatz von $m_{BS} = 3,5$ t/h Brennstoff können Nutzenergiemengen in Form von $P_{elt} = 1,5$ MW (Strom), $Q_{them} = 2$ MW (Heizwärme) und $Q_{chem} = 8$ MW (Industriegas) pro Stunde produziert werden.

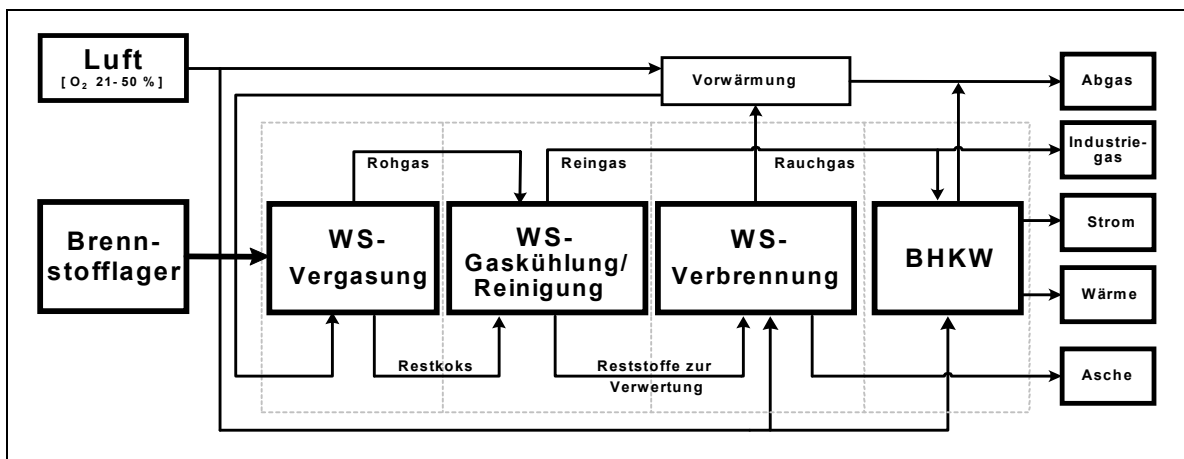


Abbildung 1: Verfahrensfliessbild des CombiPower-Plus-Prozesses

2.1 Anlagentechnik

Die dreistufige Wirbelschichtanlage (WS-Anlage), welche sich in die Prozessstufen der WS-Vergasung, WS-Kühlung und WS-Feuerung gliedert, wurde mit dem Ziel entwickelt, feste Kohlenstoffträger zur dezentralen Erzeugung von Strom, Wärme und Industriegas wirtschaftlich und zugleich ökologisch nutzbar zu machen.

Die Gesamtanlage besteht aus den Teilsystemen:

- Brennstofflager und Brennstoffqualität,
- Vergaser mit Eintragungssystem,
- Brenngasaufbereitung,
- Verbrennungsstufe mit Ascheaustrag,
- Aschelagerung,
- BHKW,
- Notfackel,
- Rückkühlwerk,
- Sauerstoffanreicherung,

die im Folgenden kurz beschreiben werden.

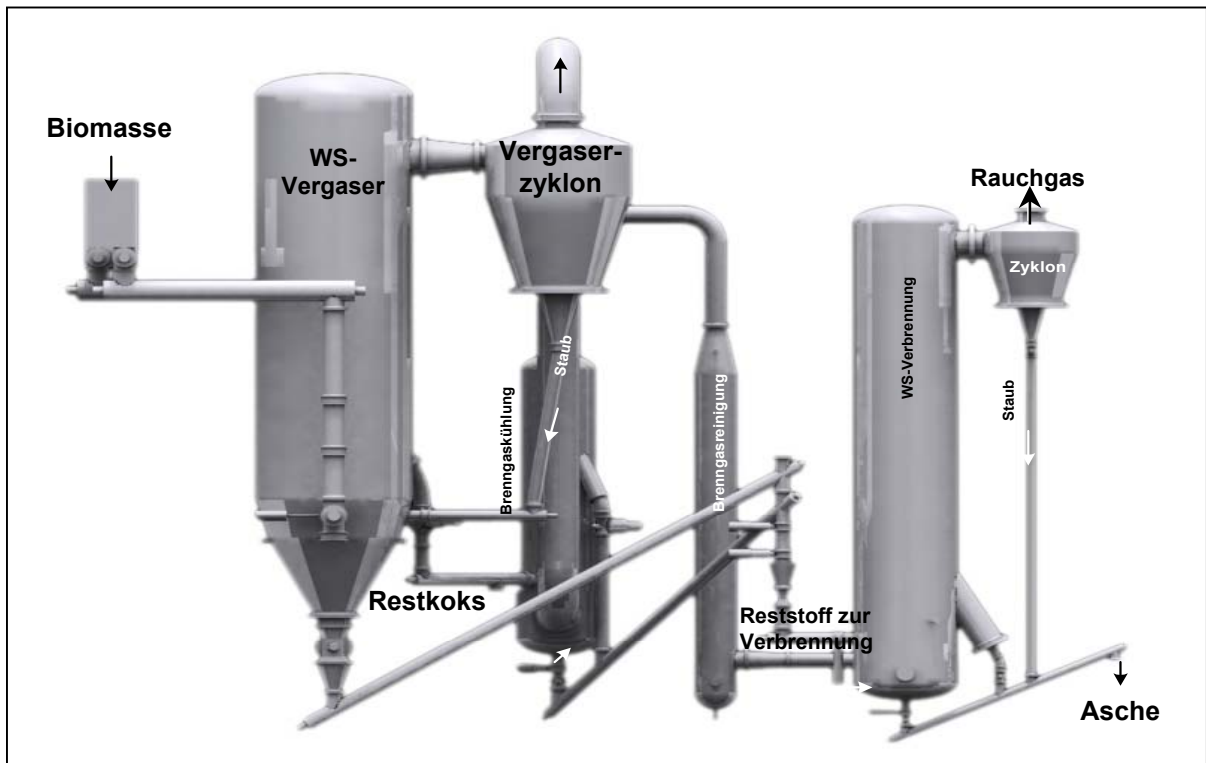


Abbildung 2: Layout der 3-stufige Wirbelschichtanlage (CombiPower-Prozess)

Brennstofflagerung und Brennstoffqualität

Voraussetzung für einen unterbrechungsfreien Dauerbetrieb mit ausgeglichener Brennstoffqualität ist eine mindestens halbjährige Brennstoffbevorratung. Eine Brennstoffvortrocknung erfolgt durch Nutzung von Abwärme aus dem Gesamtprozess.

Der Brennstoff muss entsprechend des vorgesehenen Förder- und Dosiersystems transportierbar und in der Wirbelschicht verarbeitbar sein. In der z.Z. in Planung befindliche Anlage kommt ausschließlich naturbelassenes Holz in Form von Hackschnitzeln zum Einsatz, deren Abmessung sollten übliche Maße von 20 bis 60 mm Kantenlänge aufweisen. Der Feinkornanteil mit < 20 mm Kantenlänge sowie der Überkornanteil von > 60-100 mm Kantenlänge kann 10 Masse % betragen. Bevorzugt wird Material mit < 18 % Wassergehalt (WG). Es ist aber auch der Einsatz von Brennstoffen mit 5 bis 30 % WG möglich. Der durchschnittliche untere Heizwert sollte 12 MJ/kg nicht wesentlich unterschreiten.

Der Brennstoff sollte frei von metallischen und anderen Störstoffen sein.

Die Brennstoffdosierung und -zuführung erfolgt mittels Schubboden und Trogkettenförderer.

Vergaser

Kernstück der Gesamtanlage ist der Wirbelschichtvergaser in dem das Holz mit einer unterstöchiometrischen Luftmenge in ein brennbares Gasgemisch mit den Hauptkomponenten CO, CO₂, CH₄, H₂, N₂ und Wasserdampf umgesetzt wird.

Die Vergasung findet dabei in einer stationär betriebenen Wirbelschicht mittels eines Koksmaterials als Wirbelbettmaterial und der vorgewärmten Luft als Wirbelmedium bei ca. 620 °C statt.

Der Brennstoffeintrag erfolgt oberhalb des Düsenbodens des Wirbelschichtvergasers mittels Förderschnecken. Die Rückbrandsicherung wird über ein System aus Förderschnecken sowie eines gasdicht abschließenden Doppelschiebersystems gewährleistet.

Der Vergaser wird bei geringem Überdruck (gegenüber Atmosphärendruck) betrieben, um den Druckverlust der nachfolgenden Gasreinigung zu überwinden.

Brenngasaufbereitung

Das Brenngas wird zunächst in einem Heißgaszyklon entstaubt und danach einer Kühlung und einer Reinigung unterzogen. Die Abkühlung des Brenngases von ca. 620°C Vergasungstemperatur auf ca. 100°C erfolgt im nachgeschalteten Brenngaskühler. Dieser ist ebenfalls als stationärer Wirbelschichtapparat mit indirekter Kühlung (Kühlregister mit Wasser als Kühlmedium) ausgelegt, als Wirbelbettmaterial dient der Restkoks, an welchem das Rohgas zunächst gequenchet und dann indirekt gekühlt wird. Bei der Rohgaskühlung kondensiert der im Gas enthaltene Teer am Wirbelbettmaterial (Restkoks aus dem WS-Vergaser). Der teerbeladene Restkoks wird mittels Förderschnecke in die nachfolgende Verbrennungsstufe gefördert und dort verbrannt. Durch diese Verfahrensweise wird eine kontinuierliche Erneuerung des Bettmaterials im WS-Kühler (Restkoks aus dem Vergaser in

den Kühler und anschließend als Brennstoff in die Verbrennung) und eine vollständige energetische Umsetzung des Kohlenstoffs, einschließlich des Teers, gewährleistet.

Nach einer Rohgaskühlung folgen weitere Reinigungsstufen des Brenngases mittels Wäscher, Tropfenabscheider, Wiederaufheizung, Aktivkohleabsorber und gegebenenfalls Feinstaubabreinigung. Die im WS-Kühler vom Brenngas abgegebene Wärme wird zur Aufheizung von Heizwasser genutzt.

Verbrennungsstufe

Die Reststoffe, welche bei der Gaserzeugung und -reinigung entstehen, einschließlich des Überschusswassers, werden in einer 3. stationären Wirbelschicht verdampft bzw. vollständig verbrannt. Das so erzeugte Rauchgas (es werden Verbrennungstemperatur von 900°C angestrebt) wird energetisch zur Vorwärmung des Vergasungsmittels (Luft) genutzt. Die Abgase entsprechen den Anforderungen der TA-Luft. Durch die vollständige Verbrennung des Restkokes wird die Deponiefähigkeit der Asche gewährleistet.

Ascheaustrag

Die Asche wird über eine gekühlte Zellenradschleuse sowie eine Förderschnecke ausgetragen und in einem Aschesammelbehälter gelagert.

BKHW

Das gereinigte Brenngas passiert die Gasmischregelstrecke, den Turbolader und den Gemischkühler. Als Arbeitsmaschine kommt ein Viertakt-Gas-Ottomotor zum Einsatz, der den Drehstrom-Synchrongenerator antreibt. Das Abgas wird durch einen regenerativen Thermoreaktor geleitet, in dem das restliche CO bei Temperaturen um 800°C umgesetzt wird. Die Abgaskühlung wird zur Heizwassererzeugung genutzt.

Notfackel

Die Notfackel dient der sicheren Verbrennung des Brenngases während instationärer Betriebszustände des Vergasers und der Brenngasaufbereitung (An- und Abfahren, Störungen).

Rückkühlwerk

Die Rückkühlung des Kühlwassers aus der Brenngasreinigung (Wäscher) und dem BHKW (Motorkühlung) erfolgt in einem zwangsbelüfteten Trockenkühlturm. Die dabei erzeugte warme Abluft wird zur Brennstoffvortrocknung in das dafür entsprechend gestaltete Brennstofflager geleitet, dies ermöglicht den Gesamtprozess effektiver zu gestalten (Verbesserung Heizwert des Brenngases und Reduzierung des Waschwasserüberschusses).

Sauerstoffanreicherung

Beim CombiPower-Plus-Verfahren wird die Möglichkeit genutzt, dass statt der Vergasungs- und Verbrennungsluft Luft mit einem O₂-Gehalt von bis zu 50 Vol.-% zum Einsatz kommt. Damit verändern sich die Prozessbedingungen bei der Vergasung so, dass es zu einer Heizwertsteigerung des Brenngases von ca. 5 MJ/kg auf ca. 8 MJ/kg kommt. Ebenfalls wird

eine Steigerung des Prozesswirkungsgrades erreicht, worauf im Nachfolgenden noch näher eingegangen wird

2.2 Prozessparameter

Die Prozessbilanzierung sowie die Variationsberechnung der Ein- und Ausgangsgrößen wurde mittels des bei der VER GmbH entwickelten Software-Programms „PALITO“ durchgeführt. Variiert wurde der Sauerstoffanteil im Vergasungsmittel sowie der Brennstoffmassenstrom.

2.2.1 Eingangsmedien

Als Brennstoffe für die CombiPower-Anlage kommen neben Waldrestholz und Plantagenholz auch sonstige Biomasse wie Stroh, Miscanthus, Ganzpflanzen aber auch Braunkohle als regional verfügbarer Einsatzstoff in Frage. Auch der Einsatz von Abfallstoffen, in Form von Ersatzbrennstoff (EBS) ist verfahrenstechnisch grundsätzlich möglich.

Die nachfolgende Prozessbilanzierung der CombiPower-Anlage wird beispielhaft für naturbelassenes Holz (Brennstoff 1) und für Trockenbraunkohle (Brennstoff 2) durchgeführt.

Brennstoff

Einsatzmaterial:	Holzhackschnitzel	Trockenbraunkohle
Abmessungen:	20 – 60 mm < 20 mm 5 % > 60 –100 mm 5 %	0 – 6 mm
Heizwert	14,86 MJ/kg	21,65 MJ/kg
Wassergehalt	18 %	9,9 %

Tabelle 1: Brennstoffdaten

Eingangsmedien

Brennstoff	Ohne Sauerstoffanreicherung			Mit Sauerstoffanreicherung (O ₂ = 50 %)		
	Menge an BS in kg/h	Vergasungsluft in m ³ i.N./h	Verbrennungsluft in m ³ i.N./h	Menge an BS in kg/h	Vergasungsluft in m ³ i.N./h	Verbrennungsluft in m ³ i.N./h
Holz (BS 1)	1.289	1.537	472	3.500	1.666	493
Kohle (BS2)	849	1.466	607	2.400	1.031	742

Tabelle 2: Prozessinputdaten

Sauerstoffanreicherung

Durch eine Sauerstoffanreicherung in der Vergasungsluft auf einen O₂-Gehalt von 50 %, kann die Anlagenleistung (Brennstoffdurchsatz) um den Faktor 2,2 für Holz und 2,8 für

Trockenbraunkohle bei gleichem Apparatedesign erhöht werden. Weiterhin können bei einer derartigen Verfahrensweise (Sauerstoffanreicherung im Vergasungsmittel) die spez. Investitionskosten von ca. 3.750 €/kW_(elt) auf unter 2.000 €/kW_(elt) gesenkt werden.

2.2.2 Ausgangsmedien ¹⁾

	Einheit	Strom		Wärme		Industriegas		Rauchgas		Asche	
		BS 1	BS 2	BS 1	BS 2	BS 1	BS 2	BS 1	BS 2	BS 1	BS 2
Leistung:	MW	1,5		2		8	8,5	0,9	0,4		
Volumenstrom:	m ³ _{i.N.} /h					3.600	3.300	6.730	5.835		
Massestrom:	kg/h					3.500	3.100	8.760	7.795	17	120
Temperatur:	°C					39	40	85	58	900	900
Zusammensetzung:	Vol.% (CO ₂)					17,1	1,6	15,4	15,5		
	Vol.% (H ₂ O)					4,3	4,3	17,4	9,5		
	Vol.% (N ₂)					15,1	17,2	62,4	68,5		
	Vol.% (O ₂)							4,8	6,5		
	Vol.% (H ₂)					33	26,3				
	Vol.% (CO)					28,4	50,4				
	Vol.% (CH ₄)					2,1	0,2				
Heizwert:	kJ/kg					8.200	9.900				

Tabelle 3: Prozessoutputdaten

¹⁾ Mit O₂-Anreicherung auf 50 Vol.-% im Vergasungsmittel und Industriegasproduktion

In Tabelle 3 sind die Ausgangsdaten für die Brennstoffe Holz (BS1) und Trockenbraunkohle (BS2) bei einer Energiegewinnung von $P_{\text{elt}} = 1,5$ MW und Industriegasabgabe dargestellt. Wird für die gleichen Eingangsmedien kein Industriegas benötigt oder abgegeben, so besteht die Möglichkeit der Erhöhung der Elektroenergieerzeugung und zwar bei Holz auf $P_{\text{elt}} = 4,3$ MW und bei Kohle auf $P_{\text{elt}} = 4,5$ MW. Dabei ist zu berücksichtigen, dass eine entsprechende Anzahl zusätzlicher BHKW's (Kapazitätserweiterung) zu installieren ist (Tabelle 4).

Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass neben der Erhöhung der Elektroenergieabgabe analog die Abgabemenge von Heizwärme, und zwar von $Q_{\text{therm}} = 2,0$ MW bei Holz auf $Q_{\text{therm}} = 2,7$ MW und bei Kohle auf $Q_{\text{therm}} = 3,1$ MW steigt.

Wie sich die Industriegasherstellung (als konstante Größe oder als variable Größe abhängig von einer konstanten Stromabgabe) auf die Wirtschaftlichkeit auswirkt, wird im Abschnitt 3 genauer betrachtet.

2.3 Prozessparametervariation

Als variabel wird der Sauerstoffgehalt von 21 Vol.-% bis 100 Vol.-% betrachtet. In großtechnischen Maßstab können Sauerstoffgehalte bis zu 95 % (5 % Stickstoff) wirtschaftlich mittels Druck-Adsorptions-Verfahren erzeugt werden.

Im Diagramm 2 und 3 sind die Ergebnisse der Variantenberechnung für die Gewinnung von Industriegas, Wärme und Elektroenergie aus Holz (BS1) und Kohle (BS2) in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt im Vergasungsmittel, bei einer konstanten Elektroenergieabgabe von $P_{\text{elt}} = 1,5 \text{ MW}$ und variabler Industriegasabgabe Q_{chem} dargestellt.

Des Weiteren sind aus Diagramm 4 und 5 die Berechnungsergebnisse bei einer konstanter Industriegasabgabe von $Q_{\text{chem}} = 4 \text{ MW}$ und variabler Elektroenergieerzeugung P_{elt} ersichtlich.

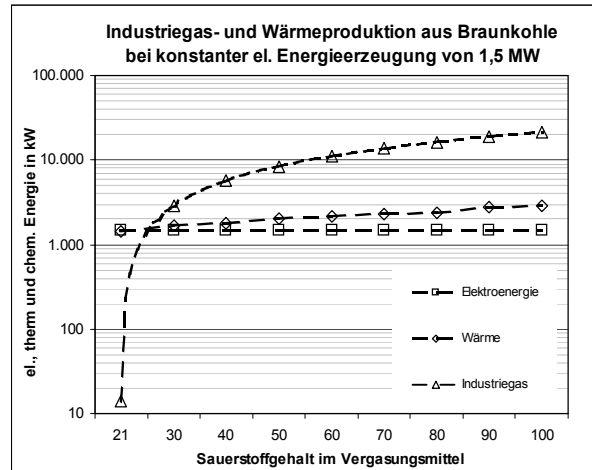
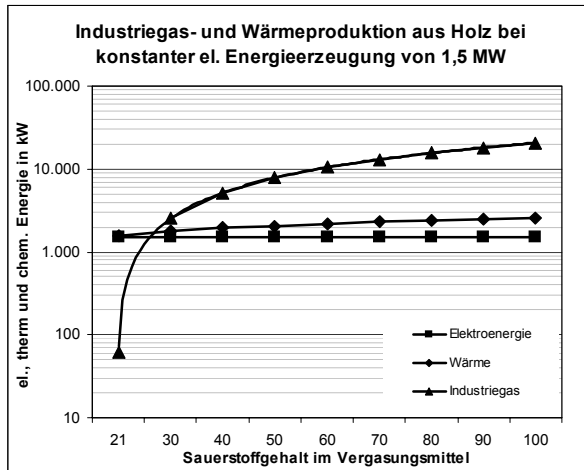


Diagramm 2: Energiebereitstellung mittels BS1

Diagramm 3: Energiebereitstellung mittels BS2

Aus Diagramm 2 und 3 ist zu erkennen, dass bei einer konstanten Elektroenergiegewinnung von $P_{\text{elt}} = 1,5 \text{ MW}$ mit dem CombiPower-Prozess, d.h. ohne Sauerstoffanreicherung ($O_2 = 21 \text{ Vol.-%}$), die im Brennstoff enthaltene Energiemenge fast ausschließlich in Elektroenergie und Wärme umgewandelt wird. Mit steigendem O_2 -Anteil kann die Brennstoffleistung in der gleichen Anlage anteilig erhöht werden. Dadurch kann der Überschuss an Brenngas bedarfsgerecht als Industriegas bereitgestellt werden. Die bedarfsgerechte Industriegasproduktion wird lediglich durch Variation des O_2 -Gehaltes im Vergasungsmittel gesteuert.

Der Einsatz von Kohle ist auf Grund des geringeren Wassergehaltes und des höheren Heizwertes aus energetischer Sicht effektiver als der von Holz. So werden beim Einsatz von Kohle und einer Sauerstoffanreicherung von $O_2 = 50 \text{ Vol.-%}$ im Vergasungsmittel neben der $P_{\text{elt}} = 1,5 \text{ MW}$ (Elektroenergie) und $Q_{\text{therm}} = 2 \text{ MW}$ (Heizwärme) auch $Q_{\text{chem}} = 8,5 \text{ MW}$ (Industriegas) bereitgestellt. Die Industriegasbereitstellung bei der Variante Holz als Brennstoff fällt um ca. 7 % geringer aus.

Bei einer max. Sauerstoffanreicherung von $O_2 = 100 \text{ Vol.-%}$ kann eine Industriegasmenge von ca. 6 t/h, mit einem durchschnittlichen Heizwert von $H_u = 9 \text{ MJ/kg}$ bei Holz (BS1) und von $H_u = 12,5 \text{ MJ/kg}$ bei Kohle (BS2), erzeugt werden.

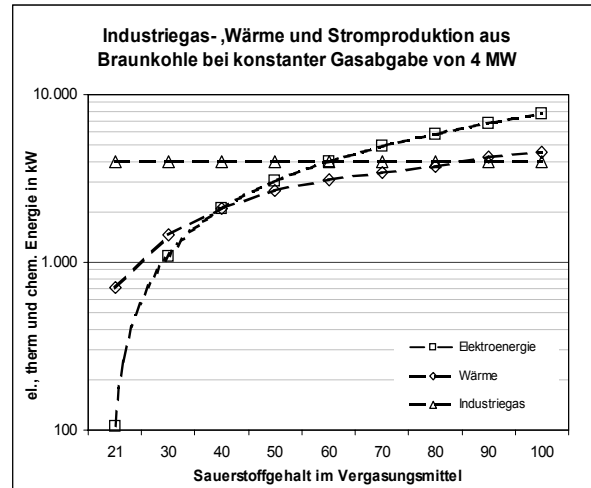
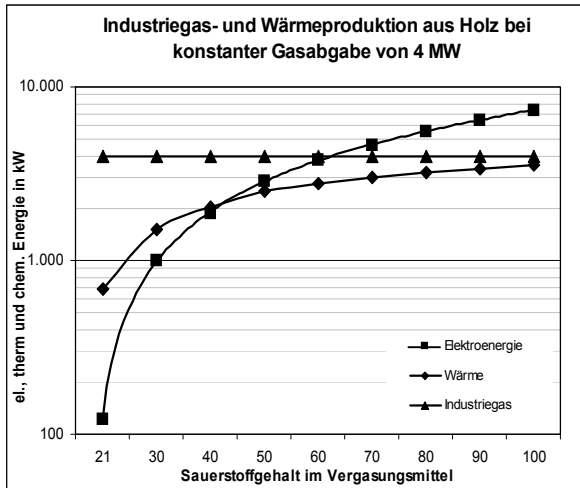


Diagramm 4: Energiebereitstellung mittels BS 1 **Diagramm 5:** Energiebereitstellung mittels BS 2

Aus Diagramm 4 und 5 wird ersichtlich, dass bei einer konstanten Industriegasbereitstellung von $Q_{\text{chem}} = 4 \text{ MW}$, die im jeweiligen Brennstoff enthaltene Energiemenge, bei reinem Luftbetrieb ($O_2 = 21 \text{ Vol.-%}$), fast ausschließlich in Industriegas und Wärme umgewandelt wird. Steigert man den O_2 -Anteil im Vergasungsmittel so kann der Überschuss an Brenngas zur Elektroenergiegewinnung genutzt werden. Es ist jedoch zu beachten, dass die Generierung von Elektroenergie an die Leistungsgröße des oder der vorhandenen BHKW's gekoppelt ist und nur eine bestimmte Teillastvariation je BHKW - Typ möglich ist.

In Tabelle 4 sind die Werte der Elektroenergiebereitstellung für Holz (BS1) und Kohle (BS2) beispielhaft für verschiedene O_2 -Gehalt, sowie die benötigte Anzahl an BHKW's (je BHKW mit $P_{\text{elt}} = 1,5\text{-}1,9 \text{ MW}$) dargestellt.

O_2 -Gehalt in Vol.-%	P_{elt} (BS 1) in kW	P_{elt} (BS 2) in kW	Anzahl der BHKW's
30	998	1.091	1
50	2.880	3.062	2
70	4.647	4.864	3
90	6.401	6.739	4

Tabelle 4: Elektroenergiebereitstellung bei konst. Industriegasabgabe von $Q_{\text{chem}} = 4 \text{ MW}$

Um eine vergleichende Aussage über die Effektivität der Energieumwandlung für Holz (BS1) und Kohle (BS2) bei Luftbetrieb bzw. beim Betrieb mit Sauerstoffanreicherung zu erhalten, wurden für beide Varianten ein exergetischer Wirkungsgrad gemäß [2] bestimmt.

Unter dem jeweils ermittelten Wirkungsgrad soll der Quotient aus der Summe der gewonnenen Exergieströme (Industriegas E_{chem} + Elektroenergie P_{elt} + Heizwärme E_Q) und der aufgewendeten Exergieströme (Brennstoff E_{chem} + Elektroenergieeigenbedarf P_{eig}) verstanden werden.

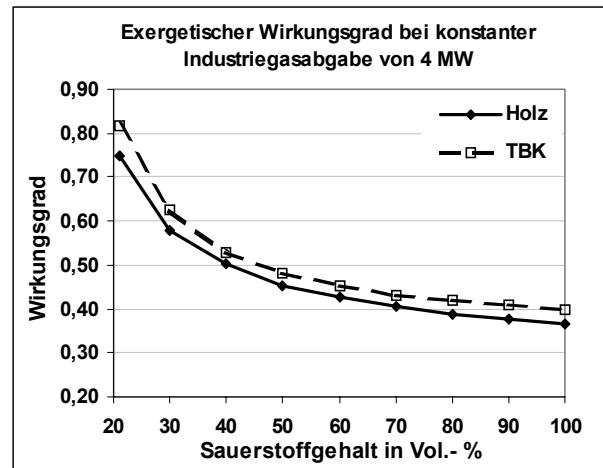
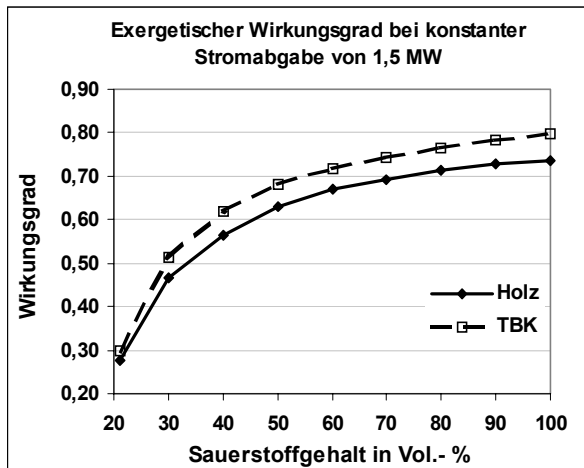


Diagramm 6: Wirkungsgrad (Industriegas variabel) **Diagramm 7:** Wirkungsgrad (P_{elt} -Abgabe variabel)

In den Diagrammen 6 und 7 sind die Berechnungsergebnisse für die Varianten konstanter Elektroenergie- und konstanter Industriegasabgabe zusammenfassend dargestellt.

Aus Diagramm 6 wird ersichtlich, dass der dargestellte Prozesswirkungsgrad bei einer konstanten Elektroenergieerzeugung, bei welcher der Umwandlungswirkungsgrad des BHKW's mit ca. 35 %, bezogen auf das Brenngas am Eintrittsstutzen des Verbrennungsmotors berücksichtigt wurde, für den Fall des Luftbetriebes mit $O_2 = 21$ Vol.-% bei ca. 28- 30 % liegt. Mit Steigerung des O_2 -Gehaltes im Vergasungsmittel wird neben der Elektroenergie noch zusätzlich, aus dem dann eingesetzten Brennstoff, Industriegas produziert. Dies führt, da man bei der Industriegasnutzung im Wesentlichen an eine thermische Nutzung z.B. als Gas für einen Industrieofen gedacht hat, zu keinen weiteren wesentlichen (Wärmeverluste nicht berücksichtigt) Umwandlungsverlusten. Man kann daher feststellen, dass bei einer derartigen Kraft-Brennstoff-Kopplung (KBK-Prozess), die Energieausbeute, bezogen auf den eingesetzten Brennstoff, mit steigendem O_2 -Gehalt im Vergasungsmittel wächst.

Aus Diagramm 7 wird ersichtlich, dass bei der betrachteten Variante einer konstanter Industriegasabgabe zunächst ($O_2 = 21$ Vol.-%) nur eine geringe Menge (vernachlässigbar klein) an Elektroenergie erzeugt wird. Steigert man wiederum den O_2 -Gehaltes im Vergasungsmittel so kann entsprechend mehr an Elektroenergie aus dem dann eingesetzten Brennstoff, und dies unter Beachtung des Umwandlungswirkungsgrades des BHKW's von ca. 35%, gewonnen werden. Dies führt bei der Anhebung des O_2 -Gehaltes im Vergasungsmittel, entsprechend des dargestellten Kurvenverlaufes, zu einer Verschlechterung des Gesamtwirkungsgrades bzw. scheinbar zu einer Abnahme der

Energieausbeute, bezogen auf die eingesetzte Brennstoffmenge. Dies stellt aber nur eine scheinbare Verschlechterung dar, denn die zusätzlich gewonnene Elektroenergie kann als reine Exergie vielfältig Anwendung finden (z.B. für eine bedarfsgerechte Spitzenlastdeckung).

Aus den Berechnungen für Trockenbraunkohle ergibt sich ein höherer Wirkungsgrad als für den Brennstoff Holz.

Die bis hierher betrachteten Varianten (konstanter Elektroenergie- und konstanter Industriegasabgabe) lassen hinsichtlich einer Bewertung noch kein abschließendes Ergebnis zu, daher wird im Folgenden eine einführende wirtschaftliche Bewertung des Prozesses vorgenommen.

3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen

Wesentlich ist, und dies sei auch an den Anfang dieses Kapitels gestellt, welche Art von Brennstoff bei der Nutzenergiegewinnung zum Einsatz kommt. Handelt es sich um naturbelassenes Holz, so wird die Stromvergütung nach dem in Deutschland geltenden Erneuerbaren Energiegesetz (EEG) geregelt, dass heißt, es kann bei der betrachteten Anlagengröße ein gesetzlich garantierter Strom-Abnahmepreis von etwa dem doppelten des zur Zeit üblichen Marktpreises erlöst werden. Für die erzeugte Heizwärme bzw. für das Industriegas werden übliche Marktpreise angenommen.

Wichtig zu erwähnen ist des Weiteren, dass für den ersten Einsatzfall des „CombiPower-Prozesses“ ein Standort in Betracht kommt, an welchem ein Fernwärmenetz vorhanden ist und die gewonnene Heizwärme über nahezu 5.000 bis 6.000 Volllaststunden eingespeist werden kann.

Für die Wirtschaftlichkeitsabschätzung werden nachfolgende Parameter vorausgesetzt.

Bestimmende Parameter sind der Brennstoffpreis, Sauerstoffgehalt im Vergasungsmittel und ob die Anlage mit konstanter Elektroenergieabgabe von $P_{\text{elt}} = 1,5 \text{ MW}$ oder konstanter Industriegasabgabe von $Q_{\text{chem}} = 4 \text{ MW}$ betrieben wird.

Faktoren wie Zinsen, Abschreibungszeiträume, Förderungen etc. werden aus Gründen der Komplexität nicht variabel betrachtet und sind in der Tabelle 5 zusammengestellt.

Basisdaten für die Wirtschaftlichkeitsberechnung	Werte	Dimension
Investitionskosten (spezifisch)	3.750	€/ kW
Investitionszulage auf Neuinvestitionen	25,0	%
Zinssatz auf eingesetztes Mittel	5,00	%
Abschreibungsdauer für Maschinen und Anlagen	10,0	a
Abschreibungsdauer auf Gebäude und Nebenanlagen	25,0	a
Strompreisvergütung für naturbelassenes Holz gemäß EEG	163,4	€/ MWh
Stromvergütung für Regelbrennstoffe (keine EEG Vergütung)	80,0	€/ MWh
Brennstoffkosten für Holz und Kohle gemäß Spezifikation	50,0	€/ t
Stromkosten für Eigenbedarf bei 100 bis 300 kW (O ₂ -Anreicherung 50 Vol.-%)	80,0	€/ MWh
Abgabepreis Wärme bei ca. 1,7 bis 2,0 MW	25,0	€/ MWh
Abgabepreis Industriegas bei 8,0 MW (O ₂ -Anreicherung 50 Vol.-%)	30,0	€/ MWh
Betriebsstunden Stromerzeugung - variiert zwischen 7.000 und 8.000	7.500	h / a
Betriebsstunden Wärmeerzeugung - variiert zwischen 4.000 und 6.000	5.000	h / a
Betriebsstunden Industriegaserzeugung - variiert zwischen 5.500 und 7.500	6.500	h / a
Personal für den Anlagenbetrieb bei 2 Personen pro Schicht	8	VBE / a
Betriebsleitung	1	VBE / a
Personalkosten / Produktion	28.000	Euro / VBE * a
Personalkosten / Betriebsleiter	40.000	Euro / VBE * a
Personalnebenkosten (bezogen auf die Gesamtpersonalkosten)	5,0	%
Instandhaltung und Wartung bezogen auf die Investsumme für (M+A)	2,0	%
Versicherung bezogen auf die Investsumme	1,0	%

Tabelle 5: Basisdaten zur Wirtschaftlichkeitsberechnung

Der in Tabelle 5 aufgeführte Wert für die Vergütung der Elektroenergie (163,4 €/ MWh) bezieht sich auf eine konstante Abgabe von $P_{\text{elit}} = 1.500 \text{ kW}$ beim Einsatz von Holz. Erhöht sich die Elektroenergieabgabe bei konstanter Industriegasabgabe von $Q_{\text{chem}} = 4 \text{ MW}$, so ändert sich der Vergütungssatz je MWh entsprechend dem EEG wie folgt:

O ₂ -Gehalt in %	30	40	50	60	70	80	90	100
P_{elit} in kW	998	1.879	2.880	3.785	4.647	5.517	6.401	7.237
Vergütung in €/MWh	170,9	160,7	156,6	154,8	153,7	153,0	144,8	138,4

Tabelle 6: Basisdaten für die Elektroenergievergütung beim Einsatz von Holz (BS1) nach EEG

Die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnungen sind in den Diagrammen 8 und 9 zusammenfassend dargestellt. Aus den Diagrammen können, neben der Variation von Brennstoffart und -kosten, der Sauerstoffgehalt (Luftbetrieb, 50 %, 70 % und 90 %), sowie ob es sich um eine Anlage mit konstanter Elektroenergie- oder Industriegasproduktion handeln soll, entsprechende Ergebnisse abgelesen werden.

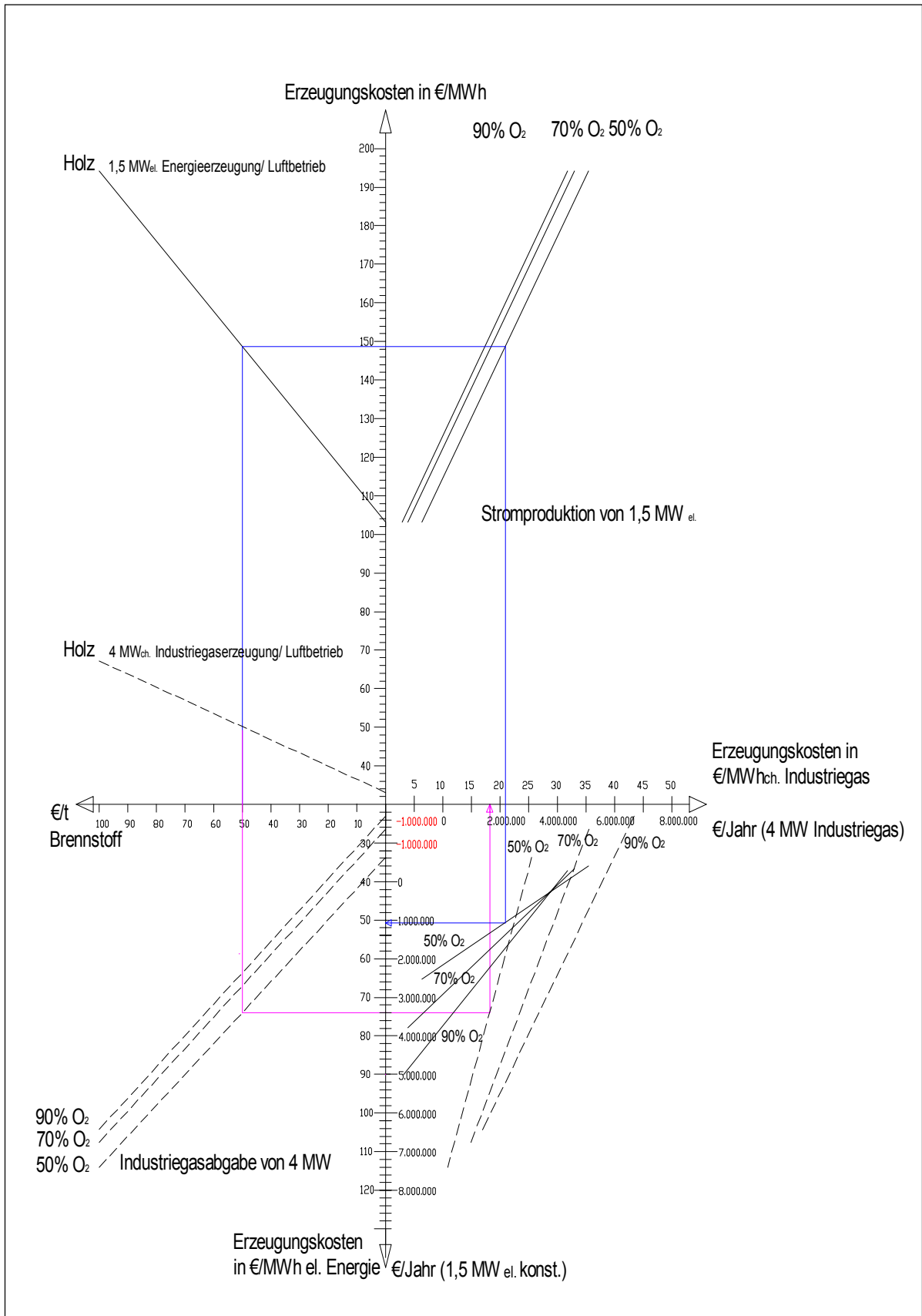


Diagramm 8: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für den Brennstoff Holz (BS1)

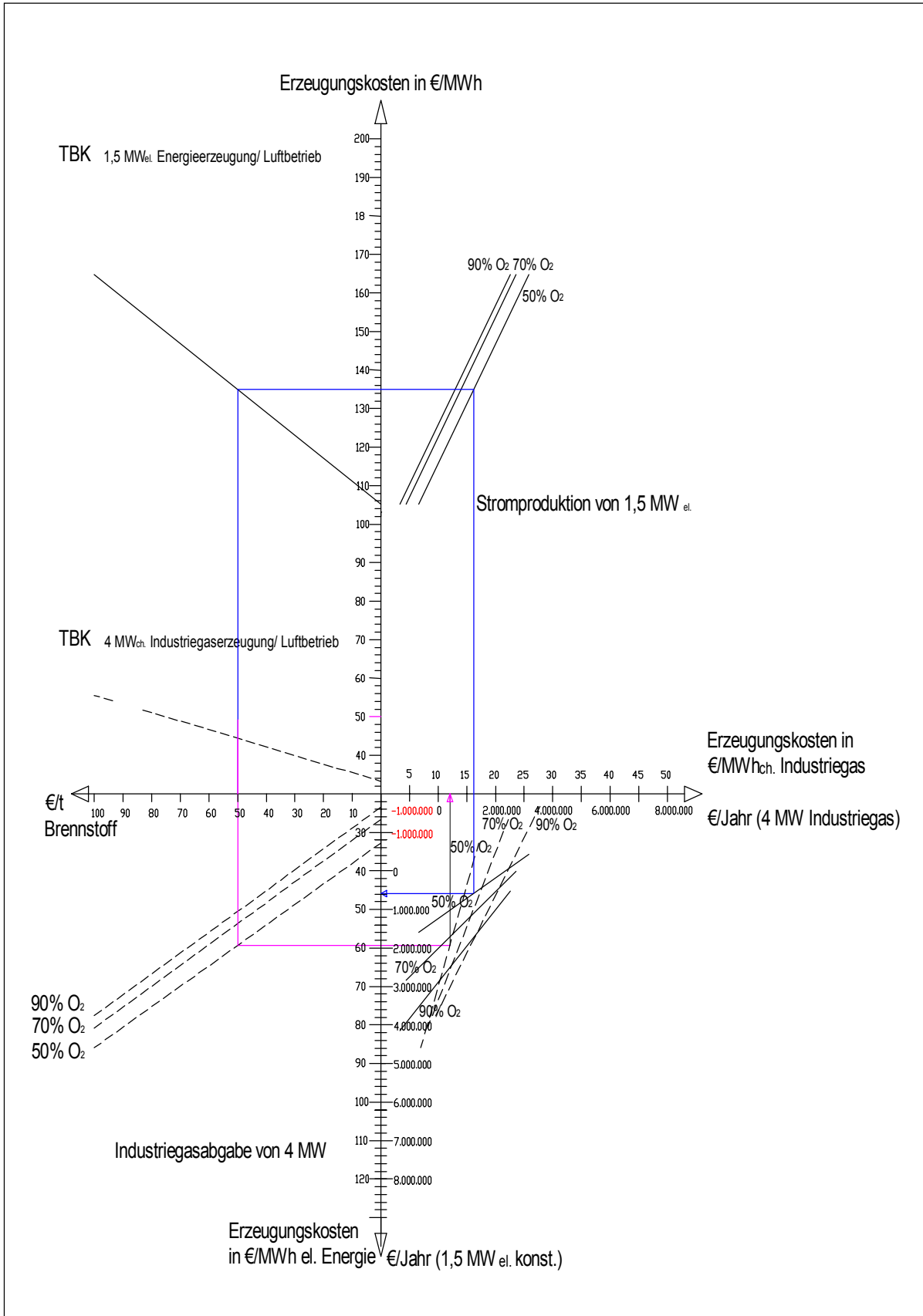


Diagramm 9: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für den Brennstoff Kohle (BS2)

In den Diagrammen 8 und 9 können die Produktionskosten für Elektroenergie und Industriegas, sowie das jeweilige Betriebsergebnis in Abhängigkeit zum Brennstoffpreis und dem Sauerstoffgehalt abgelesen werden. Dabei sind die Werte bei einer konstanten Elektroenergieabgabe von $P_{\text{elt}} = 1,5 \text{ MW}$ im Uhrzeigersinn, beginnend mit den Brennstoffkosten im 4. Quadranten, abzulesen. Entgegen dem Uhrzeigersinn sind die Werte bei einer konstanten Industriegasabgabe von $Q_{\text{chem}} = 4 \text{ MW}$ abzulesen.

Zur besseren Nachvollziehbarkeit werden die so ermittelten Werte (siehe Tabelle 7) für Holz (BS1) und Kohle (BS2) entlang der in den Diagrammen dargestellten Linien noch einmal mit Zahlenwerten vergleichend erläutert.

Verfahrensvariante	BS	Brennstoffkosten in €/t	spez. Produktionskosten Strom in €/MWh	spez. Produktionskosten Industriegas bei $O_2=50$ Vol.-% in €/MWh	Betriebsergebnis in €/Jahr ($O_2=50$ Vol.-%)
$P_{\text{elt}}=1,5 \text{ MW}$ (konst.)	Holz	50	148,67	20,85	1.067.820
	Kohle	50	135,02	16,12	577.660
-	-	-	spez. Produktionskosten Industriegas in €/MWh	spez. Produktionskosten Strom bei $O_2=50\%$ in €/MWh	-
4 MW_{chem} (konst.)	Holz	50	50,15	73,93	1.633.148
	Kohle	50	45,66	59,32	407.660

Tabelle 7: Produktionskosten und Betriebsergebnis für Holz (BS1) und Kohle (BS2)

Beginnend mit einer konstanten Elektroenergieabgabe von $P_{\text{elt}} = 1,5 \text{ MW}$ (durchgehende Linie) ergeben sich für die Brennstoffe Holz (BS1) bzw. Kohle (BS1) bei Luftbetrieb und Brennstoffkosten von 50 €/t die spez. Produktionskosten für (BS1) von 148,67 €/MWh bzw. für (BS2) von 135,02 €/MWh. Folgt man dem Verlauf in den 1. Quadranten kann man bei einem O_2 -Gehalt von 50 % die spez. Produktionskosten für das produzierte Industriegas für (BS1) von 20,85 €/MWh bzw. für (BS2) von 16,21 €/MWh ermitteln. Im 2. Quadranten kann dann für diese Varianten ein Betriebsergebnis vor Steuer für (BS1) von 1.067.820 €/Jahr bzw. für (BS2) von 577.660 €/Jahr abgelesen werden.

Trotz der geringeren spez. Produktionskosten für Elektroenergie und Industriegas fällt das Betriebsergebnis beim Einsatz von Kohle, gegenüber Holz, um ca. 40 % geringer aus. Maßgeblichen Einfluss darauf hat die Vergütung der produzierten Elektroenergie, welche beim Einsatz von Holz (BS1) als Brennstoff nach dem EEG bei rund 163,4 €/MWh und für Kohle (BS2) bei einem z.Z. am Markt erzielten Preis für Elektroenergie von 80,00 €/MWh liegt.

Betrachtet man die wirtschaftlichen Aspekte bei einer konstanten Industriegasabgabe (unterbrochene Linie) von $Q_{\text{chem}} = 4 \text{ MW}$, ergeben sich für die gleichen Anfangsbedingungen

für Industriegas die spez. Produktionskosten (positive y-Achse) für (BS1) von 50,15 €/MWh bzw. für (BS2) von 45,66 €/MWh. Auf der negativen y-Achse können dann die spez. Produktionskosten für die zusätzlich produzierte Menge an Elektroenergie in Abhängigkeit zum O₂-Gehalt abgelesen werden. Bei einer Sauerstoffanreicherung auf O₂=50 % liegen diese für (BS1) bei 73,93 €/MWh bzw. für (BS2) bei 59,32 €/MWh. Im weiteren Verlauf kann auf der x-Achse im 2. Quadranten das Betriebsergebnis für (BS1) von 1.633.148 €/MWh bzw. für (BS2) von 407.660 €/Jahr abgelesen werden. Auch für diese Variante ist der Betrieb mit dem Brennstoff Holz (BS1) durch die Vergütungsregelungen gemäß EEG, trotz höherer Produktionskosten wirtschaftlich von Vorteil.

Hinsichtlich der zu wählenden Verfahrensvariante „CombiPower“ oder „CombiPower-Plus“ wird deutlich, dass z.Z. der CombiPower-Prozess lediglich für den Brennstoff naturbelassenes Holz bei vertretbaren Brennstoffpreisen von 40 bis 60 €/t (TS 18%) und der gesetzlich zugesicherten Vergütung gemäß EEG wirtschaftlich betrieben werden kann.

Deutlich wird aber auch, dass Anlagen mit einer höheren Leistung, in diesem Fall mit einer Sauerstoffanreicherung im Vergasungsmittel, betriebswirtschaftlich von Vorteil sind.

Dieser Aspekt soll im Folgenden unter veränderten Randbedingungen noch einmal genauer betrachtet werden.

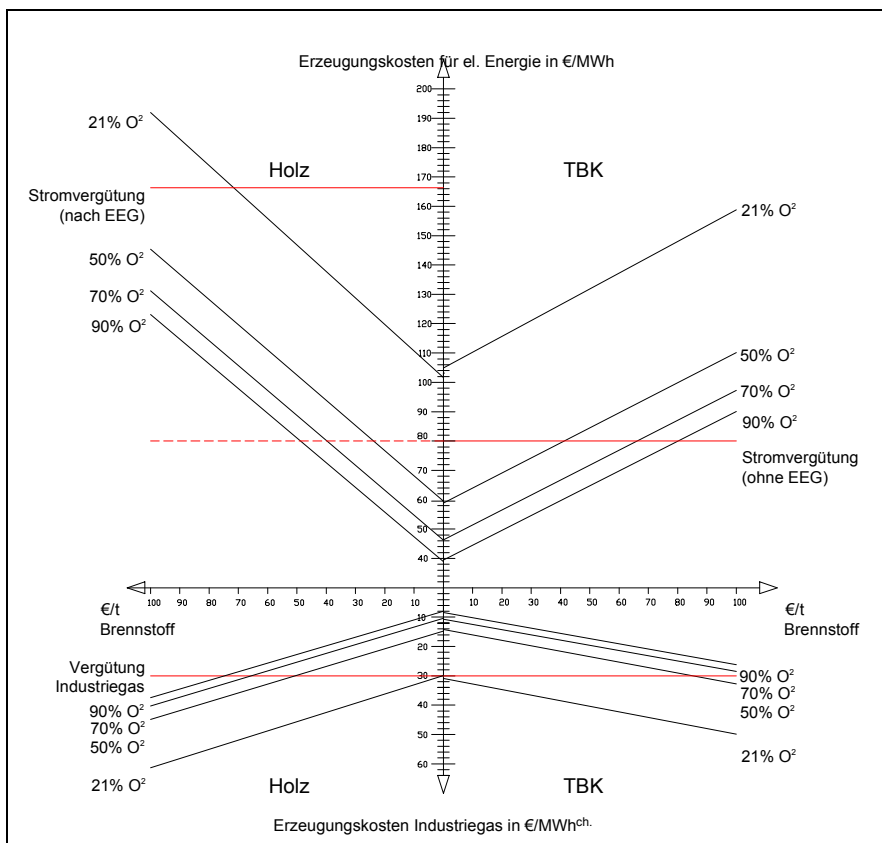


Diagramm 10: Vergleich Produktionskosten von ausschließlich Elektroenergie oder Industriegas

	Sauerstoffgehalt	O ₂ -21 Vol.-%		O ₂ -50 Vol.-%	
	Brennstoff	Holz	Kohle	Holz	Kohle
100% Elektroenergie	P _{elt} in kW	1.500	1.500	4.278	4.469
	spez. Produktionskosten in €/MWh	146,53	134,57	102,44	87,11
100% Industriegas	Q _{chem} in kW	4.300	4.300	12.226	12.740
	spez. Produktionskosten in €/MWh	45,58	41,34	29,77	24,71

Tabelle 8: Werte zu Diagramm 10

Im Diagramm 10 bzw. in Tabelle 8 werden die Produktionskosten, für den Fall einer ausschließlichen Produktion von Elektroenergie sowie von Industriegas betrachtet.

Aus den Berechnungen wird deutlich, dass der Einsatz von Kohle als Brennstoff (BS2) günstigere Ergebnisse liefert. Der Grund dafür liegt in dem höheren Heizwert des Brennstoffes (BS2) gegenüber Holz (BS1) bzw. der sich daraus ergebenden geringeren Brennstoffmenge bei gleicher Anlagenleistung.

Betrachtet man nun die reine Elektroenergieerzeugung so ist der Einsatz von Holz (BS1) wirtschaftlicher darstellbar, da wie bereits erläutert hier die Richtlinien der Vergütungsregelungen des EEG anzuwenden sind. Beim Einsatz von Kohle (BS2) kann nach den heute erzielbaren Verkaufserlösen für Elektroenergie von 80 €/MWh kein wirtschaftlicher Betrieb mit ausschließlich reiner Elektroenergieerzeugung, unter der Fortaussetzung der betrachteten Anlagengröße, dargestellt werden. Es ist daher für den Fall des Einsatzes von Kohle (BS2) als Brennstoff, wie dies mit dem „CombiPower-Plus-Verfahren“ in dieser Leistungsgröße auch vorgestellt wurde, zu mindestens die gekoppelte Produktion von Elektroenergie, Heizwärme und Industriegas erforderlich. Da sich für den Fall des Einsatzes von Kohle als Brennstoff die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen in der hier betrachteten Leistungsgröße im Grenzbereich zu einem positiven Betriebsergebnis befinden, ist in jedem Fall eine genaue Standortbewertung erforderlich.

Weiterhin ergibt sich für eine ausschließliche Produktion von Industriegas, dass der Einsatz von Kohle als Brennstoff (BS2) zu bevorzugen ist. Diesbezüglich sei nochmals auf die Tatsache verwiesen, dass bei einer reinen Industriegasproduktion das Erneuerbaren Energiegesetz (EEG) nicht zur Anwendung gelangt und somit auch eine Bevorzugung von Holz als Brennstoff (BS1) nicht gegeben ist.

4 Zusammenfassung

Mit dem vorgestellten Verfahren, welches sich durch die Kombination aus Wirbelschichtvergasung mit Wirbelschichtkühlung des Brenngases (Teer- und Staubeinbindung im Restkohlenstoff) sowie der vollständigen energetischen Reststoffnutzung mittels einer Wirbelschichtverbrennung auszeichnet, ist eine bedarfsgerechte dezentrale Produktion von Elektroenergie und Heizwärme aus Biomasse sowohl verfahrenstechnisch als auch wirtschaftlich, gemäß den Regelungen des Erneuerbaren Energiengesetzes (EEG) möglich.

Durch eine Sauerstoffanreicherung im Vergasungsmittel kann im „CombiPower-Plus-Verfahren“ neben Elektroenergie und Heizwärme zusätzlich auch ein Industriegas mit einem Heizwert von ca. 8 MJ/kg (bei O₂=50 Vol.-%) bereitgestellt werden.

Weiterhin wird bei dem „CombiPower-Plus-Prozess“ eine anlagenbedingte Leistungssteigerung, der ansonsten baugleichen „CombiPower-Anlage“, auf das 2,5 bis 3-fachen der Brennstoffleistung erzielt. Dies lässt eine Verringerung der spez. Investitionskosten von ca. 3.750 €/kW (P_{elt}) auf unter 2.000 €/kW (P_{elt}) erwarten.

Verfahrensbedingt fallen keine Reststoffe wie, Teer und Staub aber auch kein prozessbedingtes Abwasser an.

Bei einer weiteren Verteuerung der Energierohstoffe auf dem internationalen Markt, bietet sich neben der Nutzung regenerativer Brennstoffe wie Holz, welcher durch die Vergütungsregelungen des EEG für eine dezentrale Stromerzeugung in Deutschland zu bevorzugen ist, auch die Möglichkeit die regional verfügbare Braunkohle als Brennstoff für eine dezentrale Energieerzeugung wirtschaftlich zur Anwendung zu bringen.

5 Referenzen

- [1] www.tecson.de/rohoel.gif
- [2] H.D. Baehr : Thermodynamik (Achte Auflage), Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1992
- [3] E. Rebhan u.a.: Energiehandbuch (Gewinnung, Wandlung und Nutzung von Energie), Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2002
- [4] VER GmbH, Studie zur Entwicklung des CombiPower-Verfahrens, Firmenintern, 2005