

Karlsruhe, 18. Dezember 2009

DVGW-EBI/SB/FG

## **DVGW-F&E-Kleinprojekt**

### **„Energetische Betrachtung der thermochemischen Erzeugung von gasförmigen Brennstoffen und anschließender dezentraler Nutzung mit innovativen Verwendungstechnologien“**

#### **Kurzbericht**

**Gefördert durch:** DVGW – Hauptgeschäftsführung  
Josef-Wirmer-Straße 1 – 3  
53123 Bonn

**Projektleiter:** Dr.-Ing. Siegfried Bajohr  
Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Frank Graf  
DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut  
der Universität Karlsruhe (TH)  
Abteilung Gastechologie

# Inhaltsverzeichnis

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Aufgabenstellung .....</b>                                       | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>Thermochemische Erzeugung von gasförmigen Brennstoffen .....</b> | <b>2</b>  |
| 2.1      | Erzeugung von SNG und H <sub>2</sub> aus Kohle.....                 | 2         |
| 2.1.1    | Historie.....   | 2         |
| 2.1.2    | SNG aus Steinkohle.....   | 3         |
| 2.1.3    | H <sub>2</sub> aus Kohle .....                                      | 4         |
| 2.2      | Erzeugung von SNG und H <sub>2</sub> aus Biomasse .....             | 6         |
| <b>3</b> | <b>Gesamteffizienz zentrale und dezentrale Stromerzeugung .....</b> | <b>9</b>  |
| 3.1      | Konventionelle Stromerzeugung .....                                 | 9         |
| 3.2      | Dezentrale Stromerzeugung .....                                     | 11        |
| <b>4</b> | <b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>                           | <b>14</b> |
| <b>5</b> | <b>Literatur.....</b>   | <b>15</b> |

# 1 Aufgabenstellung

Die thermochemische Erzeugung von gasförmigen Brennstoffen wie SNG oder Wasserstoff stellt eine interessante Variante zur Veredelung fester Brennstoffe (z.B. Steinkohle oder ligninreiche Biomasse) dar. Im Gegensatz zur zentralen Stromerzeugung in Großkraftwerken besteht die Möglichkeit, dezentral energieeffiziente Kraft-Wärme-Kopplungstechnologien einzusetzen, die einen hohen energetischen Gesamtwirkungsgrad ermöglichen. Im Rahmen einer Kurzstudie soll geklärt werden, ob die dezentrale Verstromung über die Einspeisung von SNG bzw. Wasserstoff energetisch höhere Gesamtwirkungsgrade ermöglicht als die zentrale Verstromung in Kohlekraftwerken.

Zunächst sollen verschiedene Kraftwerkskonzepte mit und ohne CCS energetisch bewertet werden. Hierbei sollen insbesondere auch derzeit absehbare Entwicklungen in der Kraftwerkstechnologie berücksichtigt werden. Des Weiteren werden verschiedene Erzeugungstechnologien von SNG und H<sub>2</sub> aus Kohle analysiert. Zur Bewertung der energetischen Gesamtwirkungsgrade werden die Gesamtprozessketten der zentralen Verstromung in Großkraftwerken mit der dezentralen Nutzung von gasförmigen Brennstoffen mit Kraft-Wärme-Kopplung verglichen. Für die Kraft-Wärme-Kopplung werden derzeit erreichbare Wirkungsgrade (BHKW) und angestrebte Zielbereiche (z.B. Brennstoffzelle) angesetzt.

## 2 Thermochemische Erzeugung von gasförmigen Brennstoffen

### 2.1 Erzeugung von SNG und H<sub>2</sub> aus Kohle

#### 2.1.1 Historie

Motiviert durch die Ölkrise in den 1970ern wurden zahlreiche Verfahren zur thermochemischen Erzeugung von SNG aus Kohle entwickelt. Neben verschiedenen Methanisierungsverfahren wurden optimierte Vergasungsprozesse entwickelt. 1984 ging die bisher einzige großtechnische Anlage kommerzieller Technologie in Betrieb, mit der bei einer thermischen Gesamtleistung von 2 GW neben dem Hauptprodukt SNG auch elektrische Energie (HT-Dampferzeugung), Grundstoffe für die chemische Industrie sowie CO<sub>2</sub> für EOR (Enhanced Oil Recovery) produziert werden (Abb. 2.1, Abb. 2.2). Bei dieser Anlage wird eine SNG-Effizienz von ca. 61 % (bezogen auf die eingesetzte Braunkohle) erreicht [1].



Abb. 2.1 SNG-Anlage North Dakota [2]

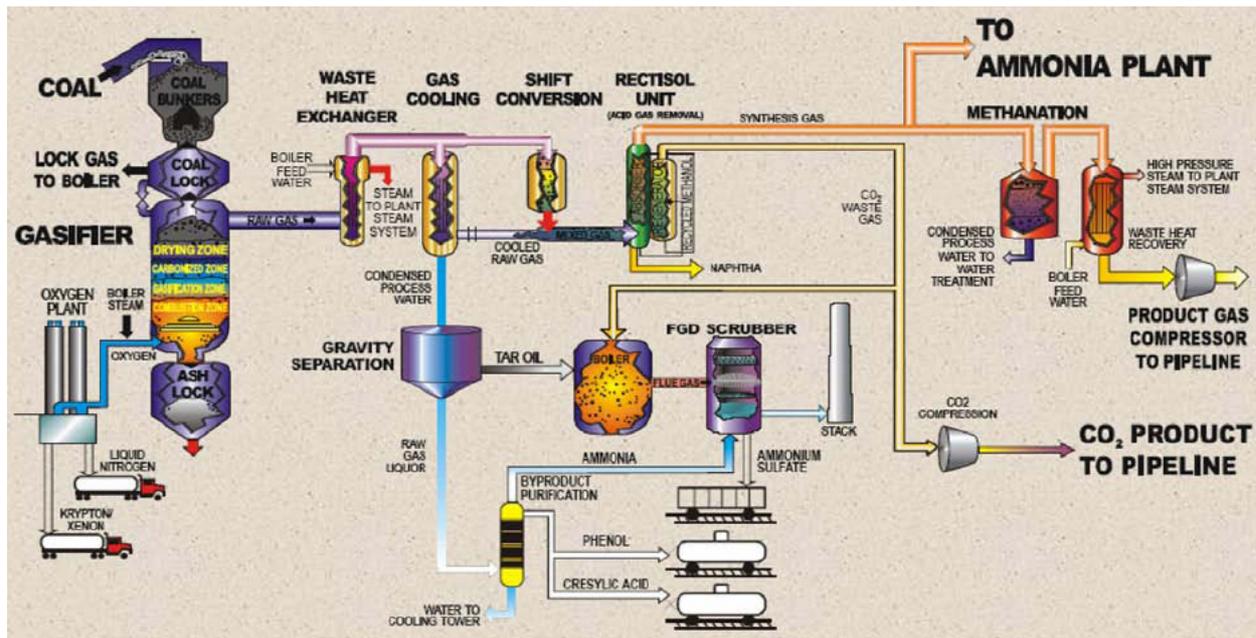


Abb. 2.2: SNG-Anlage North Dakota [2]

## 2.1.2 SNG aus Steinkohle

Bisher existieren keine SNG-Anlagen, die mit Steinkohle als Einsatzstoff betrieben werden. Unter Zugrundelegung der folgenden Annahmen, die auf verschiedenen Literaturquellen [3-5] und eigenen Berechnungen basieren, wurden verschiedene Prozessketten definiert und energetisch bewertet. Es ist anzumerken, dass für eine exakte Berechnung sämtliche standort- und einatzstoffbezogene Einflussgrößen bekannt sein müssen. Die im Folgenden dargestellten Werte können daher nur als Abschätzung verwendet werden.

### Annahmen

- Brennwert/Heizwert Steinkohle: 30,8/29,8 GJ/t, Wasser- und Aschegehalt 12,3 Mass.-%
- Brennstoffleistung: 2.800 MW (entspricht 1.200 MW<sub>el</sub>, bei einem Wirkungsgrad von 43 %)
- Massenstrom Kohle: 327,3 t/h (roh) / 287 t/h (waf)
- Rectisol-Wäsche zur Gasreinigung
- Der Eigenbedarf an elektrischer Energie wurde mit einem Erzeugungswirkungsgrad von 43 % berücksichtigt

- Elektrischer Energiebedarf der Luftzerlegung: 0,5 kWh/m<sup>3</sup> Luft
- Abwärmenutzung (Festbettvergasung, Shift, Methanisierung) zur Dampferzeugung
- Einspeisedruck 80 bar, Verdichtungswirkungsgrad 0,75

Mit diesen Annahmen wurden für drei in Frage kommende Vergasungsverfahren (Lurgi-Festbettvergaser, Ruhr 100 Festbettvergaser, Shell- Flugstromvergaser) SNG-Effizienzen berechnet (Tab. 2.1). Für die Berechnungen wurden alle relevanten Prozessschritte (Brennstoffaufbereitung, Vergasung, Gasreinigung, SNG-Synthese, Gasaufbereitung und -einspeisung) inklusive Hilfsaggregate (z.B. Luftzerlegung, Dampferzeugung) berücksichtigt. Die Gesamteffizienz an SNG liegt abhängig vom Vergasungsverfahren zwischen 53 und 65 %. Bei Berücksichtigung von CCS-Technologie verringern sich diese Werte um ca. 5 %-Punkte. In Verbindung mit CCS-Technologie können 65 % des Kohlenstoffs in Form von CO<sub>2</sub> abgetrennt und beispielsweise für EOR eingesetzt werden.

Tab. 2.1: Ergebnisse zur SNG-Effizienz (ohne CCS) für den Einsatzstoff Steinkohle

| Verfahren | p <sub>Vergaser</sub><br>in bar | T <sub>Vergasung</sub><br>in °C | Sauerstoff-<br>bedarf in m <sup>3</sup> /t<br>(waf) | Dampf/O <sub>2</sub> -<br>Verhältnis in<br>kg/m <sup>3</sup> (waf) | SNG-Effizienz<br>in % |
|-----------|---------------------------------|---------------------------------|---|--|-----------------------|
| Flugstrom | 30                              | 1.450                           | 632   | 0,08   | 53                    |
| Festbett  | 30                              | 700 -<br>1.000                  | 424   | 6  | 54                    |
| Ruhr 100  | 90                              | 700 -<br>1.000                  | 312   | 6  | 65                    |

### 2.1.3 H<sub>2</sub> aus Kohle

Im Folgenden wurde geprüft, ob eine H<sub>2</sub>-Erzeugung bzw. H<sub>2</sub>/SNG-Co-Erzeugung den Gesamtwirkungsgrad der Brennstoffherzeugung erhöht. Den eigenen Berechnungen wurden zwei Konzepte aus der Literatur [6,7] gegenübergestellt. Abhängig von den im vorherigen Abschnitt verwendeten Vergasungsverfahren wurden Brennstoff-Gesamteffizienzen von 58 bis 68 % erreicht. Bei Berücksichtigung von CCS-

Technologie verringern sich diese Werte um ca. 5 %-Punkte. Im Vergleich zu zwei Erzeugungskonzepten aus der Literatur liegen die eigenen Ergebnisse deutlich niedriger. Bei diesen Konzepten werden durch interne Verschaltungen sämtliche Möglichkeiten zur Erzeugung von Dampf und elektrischer Energie genutzt. Ob sich diese mit vertretbarem technischem Aufwand realisieren lassen, muss im Einzelfall geprüft werden. Beim IGHP-Prozess (Abb. 2.3) werden theoretische H<sub>2</sub>-Erzeugungseffizienzen von 72 %, beim CPH-Prozess (Abb. 2.4) von 67 % erreicht. Außerdem wird bei beiden Prozessen elektrische Energie erzeugt, wodurch energetische Gesamtwirkungsgrade von ca 75 % inkl. CCS erreicht werden.

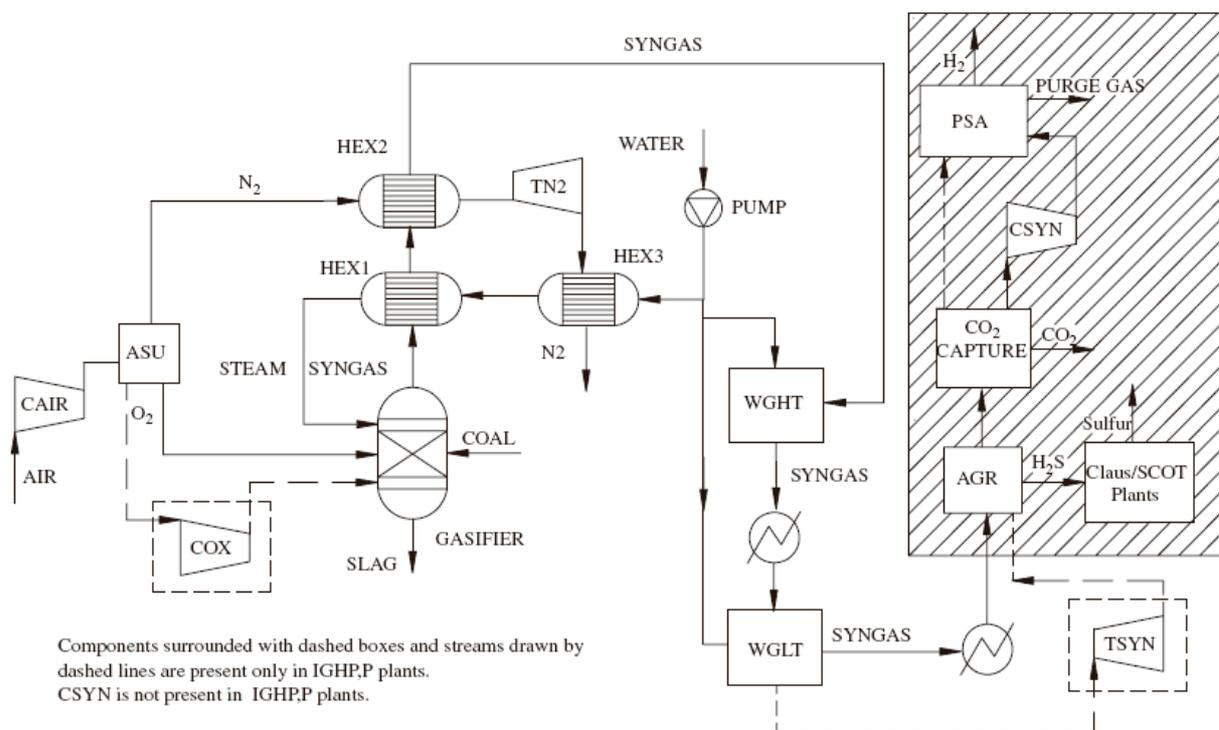


Abb. 2.3: IGHP-Prozess (Integrated Gasifier for Hydrogen Production) mit CO<sub>2</sub>-Abtrennung (P<sub>th</sub> = 1.800 MW)

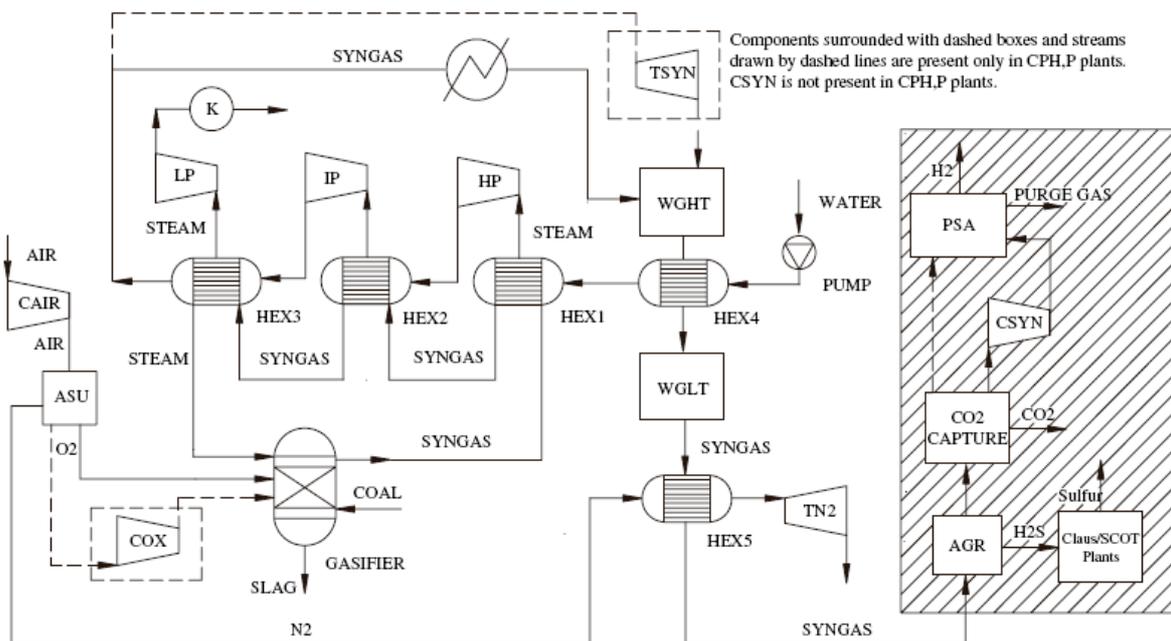


Abb. 2.4: CPH-Prozess (Combined Power and Hydrogen) mit CO<sub>2</sub>-Abtrennung (P<sub>th</sub> = 1.800 MW)

## 2.2 Erzeugung von SNG und H<sub>2</sub> aus Biomasse

Die Erzeugung von SNG aus ligninreicher Biomasse stellt eine interessante Alternative zur energetischen Nutzbarmachung von Biomasse dar. Im Vergleich zur oft diskutierten FT-Synthese liegt die erzielbare Ausbeute an Zielprodukten etwa 50 % höher. Die Herausforderung in der Übertragung von Verfahrenskonzepten aus der Kohletechnologie auf den Einsatzstoff ligninreiche Biomasse liegt vor allem im dezentralen Anfall der Biomasse und der geringen Energiedichte. Die im Vergleich zur Erzeugung von SNG aus Kohle um mindestens eine Größenordnung kleineren Anlagengrößen bedingen möglichst einfache und robuste Verfahrenskonzepte, die nur bedingt aus der Kohletechnologie abgeleitet werden können. Sämtliche Verfahrensschritte aus der SNG-Prozesskette (Abb. 2.5) werden derzeit in verschiedenen Forschungs- und Demonstrationsprojekten erprobt, sind teilweise schon kommerziell erhältlich oder stehen kurz vor der Kommerzialisierung. Um möglichst hohe energetische Gesamtwirkungsgrade zu realisieren, muss neben der Erzeugung von SNG auch die anfallende Abwärme beispielsweise in Wärmenetzen, ORC-Prozessen oder Industrieanwendungen genutzt werden.

Wichtig für die weitere Entwicklung sind Demonstrationsprojekte, anhand derer die technische Realisierbarkeit nachgewiesen und erste Betriebserfahrungen gesammelt werden können. Zu nennen sind hierbei insbesondere die Aktivitäten am Biomassefor-

schungszentrum Güssing, wo bereits eine 1 MW Wirbelschichtmethanisierung erprobt wird. In Geislingen wird unter Federführung der Energieversorgung Filstal GmbH & Co. KG (EVF) ein Standort entwickelt, an dem verschiedene Bioenergieverfahren unter kommerziellen Bedingungen realisiert und begleitende Forschungsaktivitäten vorgenommen werden sollen.

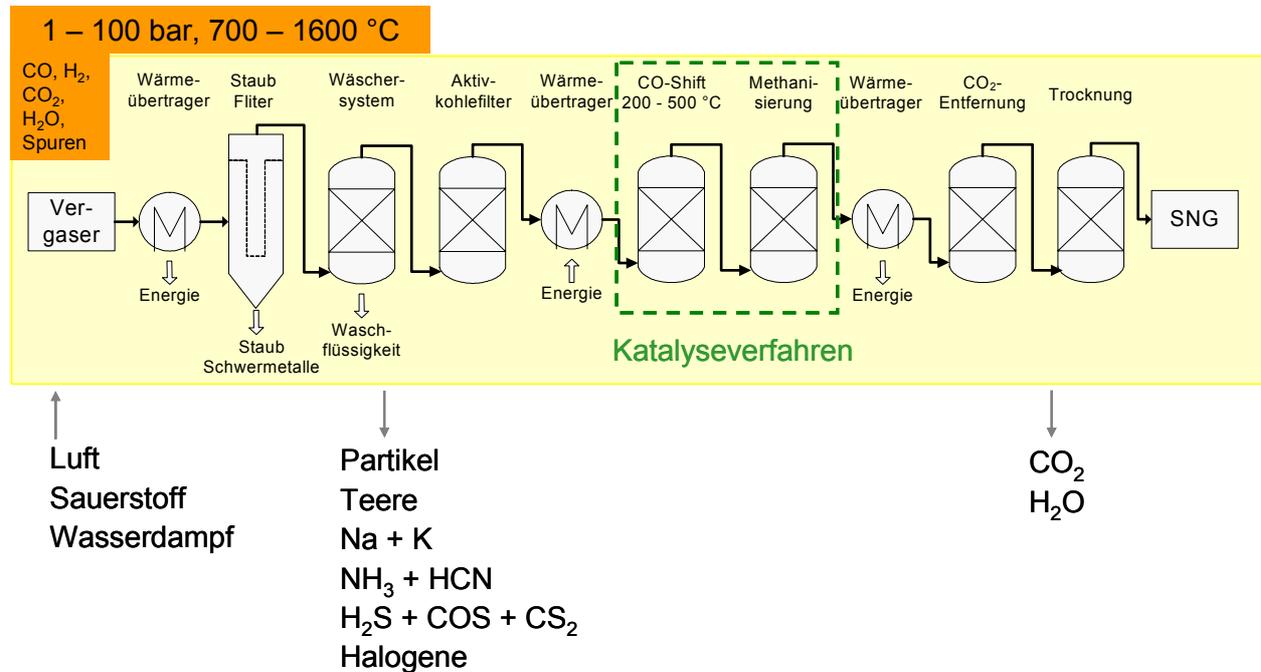


Abb. 2.5: Übersicht Prozesskette SNG-Erzeugung aus Biomasse

## SNG aus Biomasse

In Abhängigkeit von der eingesetzten Biomasse und den verwendeten Verfahren ergeben sich SNG-Effizienzen von 60 bis 65 % bezogen auf den Heizwert des Einsatzstoffes. In Verbindung mit Wärmenutzungskonzepten (Nahwärmenetze, ORC-Prozess) lassen sich energetische Gesamtwirkungsgrade bis zu 80 % realisieren.

## H<sub>2</sub> aus Biomasse

In der Literatur [8] werden H<sub>2</sub>-Effizienzen von 73 bis 81 % bezogen auf den Heizwert von trockenem Holz angegeben (ohne Berücksichtigung von Hilfsenergien). Je nach gewünschtem Reinheitsgrad des erzeugten Wasserstoffs müssen hiervon noch 5 bis 15 %-Punkte für die Gasaufbereitung, Verdichtung etc. abgezogen werden. Nach eigenen Berechnungen für eine Holzvergasungsanlage mit  $P_{th} = 10$  MW folgt unter Berücksichti-

gung aller Verbräuche an Hilfsenergien ein  $H_2$ -Wirkungsgrade von ca. 70 %. Hierbei wird angenommen, dass für die Einspeisung in das Erdgasnetz keine Anforderungen außer G 260 und G 262 erfüllt werden müssen. Auch in diesem Fall kann der energetische Gesamtwirkungsgrad analog zur SNG-Erzeugung durch Nutzung der anfallenden Wärmeströme weiter gesteigert werden.

## 3 Gesamteffizienz zentrale und dezentrale Stromerzeugung

### 3.1 Konventionelle Stromerzeugung

In Abb. 3.1 ist die zeitliche Entwicklung des elektrischen Wirkungsgrades für die konventionellen fossilen Energieträger Braunkohle, Steinkohle und Erdgas dargestellt. Die derzeit realisierbaren Wirkungsgrade liegen zwischen 43 % (Braunkohle) und 59 % (Erdgas). In den nächsten 10 Jahren sind Erhöhungen im niedrigen einstelligen Prozentbereich zu erwarten.

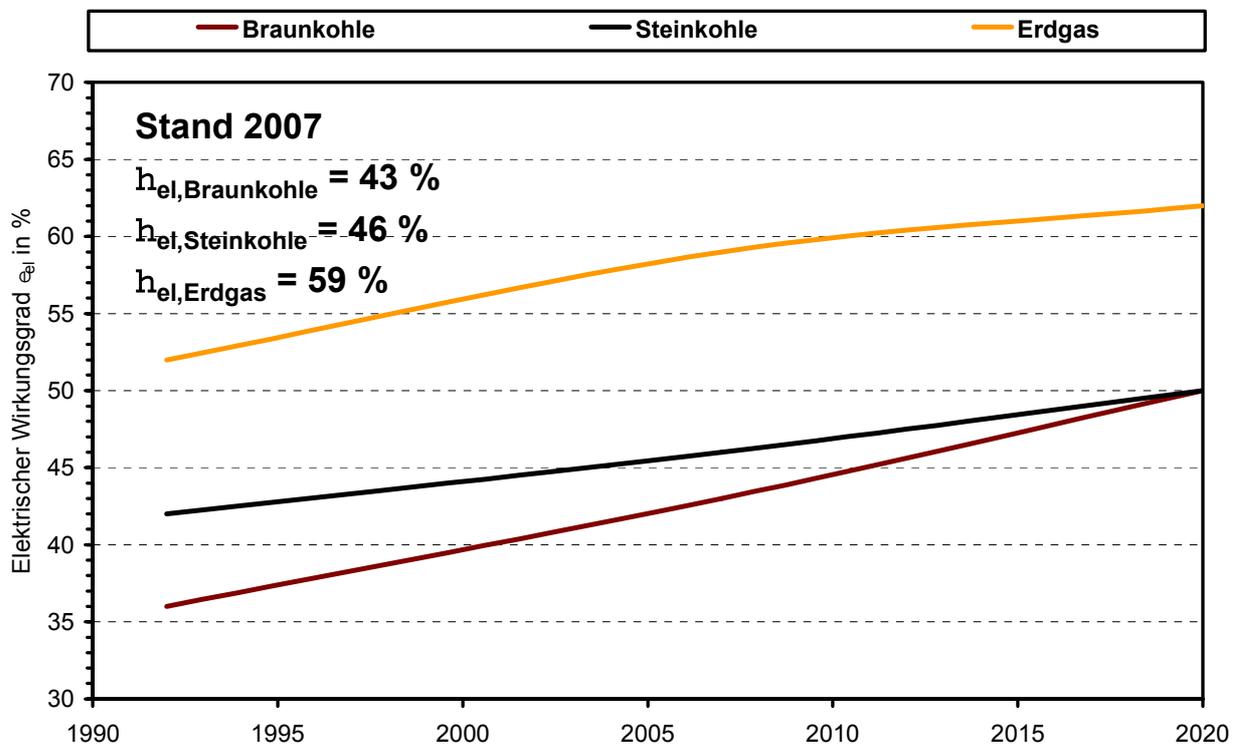


Abb. 3.1 Zeitliche Entwicklung der elektrischen Wirkungsgrade bei der konventionellen Stromerzeugung [9]

Große Hoffnungen werden derzeit in IGCC-Technologien gesetzt, mit denen sich theoretisch deutlich höhere Wirkungsgrade als bei der konventionellen Kohleverstromung erzielen lassen. Bisherige Erfahrungswerte zeigen jedoch keine signifikante Steigerung des elektrischen Wirkungsgrades bei gleichzeitig deutlich erhöhter Komplexität der Ver-

fahren [10]. Bei Angaben von Nettowirkungsgraden von ca. 55 % [11] ist unklar, ob sämtliche Hilfsenergien (beispielsweise für die Luftzerlegung) berücksichtigt wurden.

Durch die Berücksichtigung des Energieaufwands für die CO<sub>2</sub>-Abtrennung, -Transport und -Speicherung (CCS) sinken die elektrischen Wirkungsgrade um weitere 7 - 14 %-Punkte [12]. Die vorhandenen Literaturangaben unterliegen einem hohen Schwankungsbereich, da die Annahmen für die CCS-Maßnahmen sehr unterschiedlich energetisch bewertet werden. In Abb. 3.2 sind elektrische Gesamtwirkungsgrade für verschiedene Prozessvarianten unter Berücksichtigung von Transportverlusten bis zum Endverbrauch vergleichend gegenübergestellt. Es ist zu erkennen, dass die zu erwartenden elektrischen Wirkungsgrade für Kohlekraftwerke mit CCS kaum über 40 % liegen dürften.

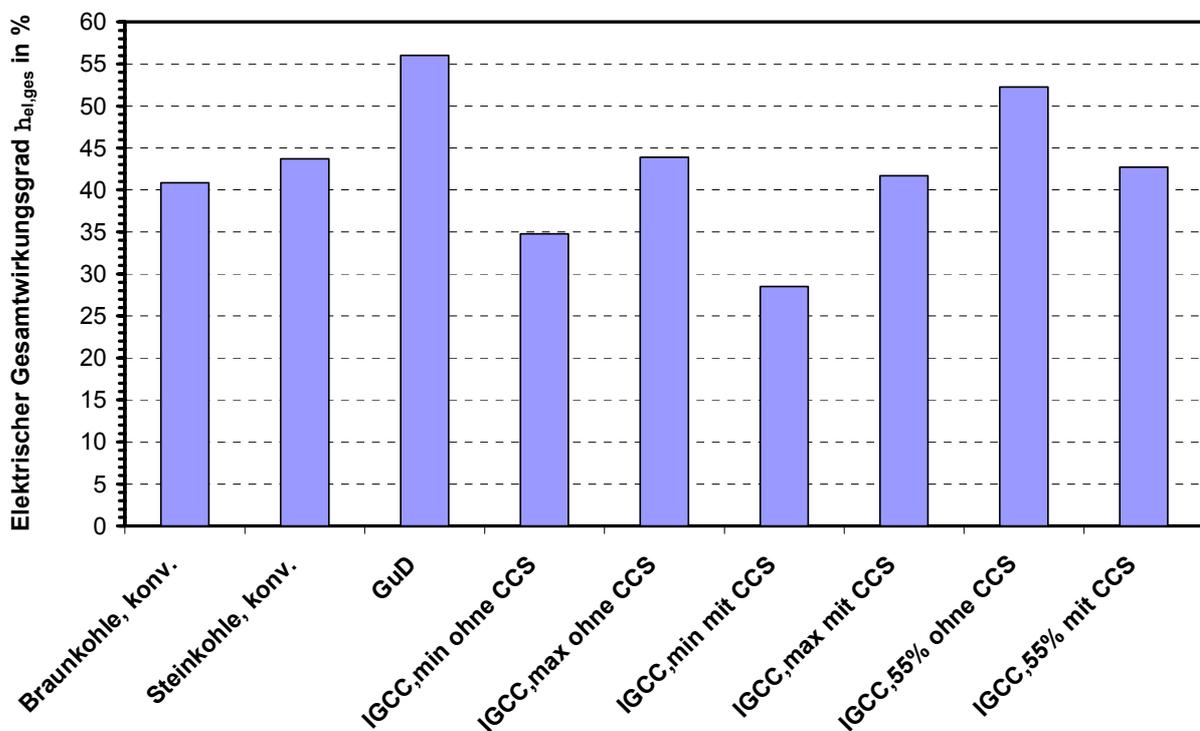


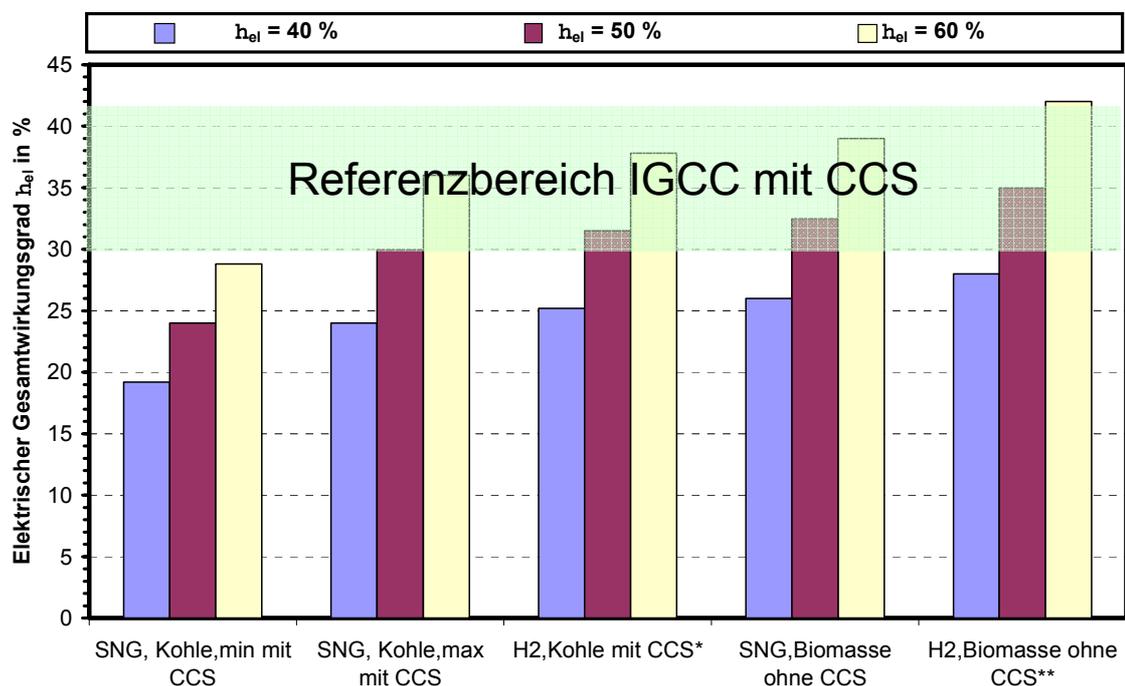
Abb. 3.2: Gesamteffizienz der zentralen Stromerzeugung für verschiedene Kraftwerkskonzepte (inkl. 5 % Transportverluste)

Der energetische Gesamtwirkungsgrad liegt durch die Auskopplung von Fernwärme im Bundesdurchschnitt 5 bis 6 %-Punkte über dem elektrischen Wirkungsgrad [13]. Auf absehbare Zeit ist eine signifikante Erhöhung jedoch nicht zu erwarten, da der hierfür notwendige Ausbau der Fernwärmenetze mit erheblichen Kosten verbunden wäre.

### 3.2 Dezentrale Stromerzeugung

Die dezentrale Kraft-Wärme-Kopplung ermöglicht hohe energetische Gesamtwirkungsgrade bis zu 85 %, wenn neben der erzeugten elektrischen Energie auch für die anfallende Abwärme kontinuierliche Nutzungsmöglichkeiten bestehen. Im Rahmen der vorliegenden Kurzstudie wurden diese Nutzungsmöglichkeiten nicht näher betrachtet, da der Schwerpunkt auf den Gaserzeugungstechnologien lag.

Elektrische Wirkungsgrade von ca. 40 % sind mit derzeit verfügbaren Technologien erreichbar. Durch technische Optimierungen bzw. durch die Einführung neuer Technologien (z.B. Brennstoffzellen) sollten zukünftig elektrische Wirkungsgrade bis zu 60 % realisierbar sein. Daher wurde in der folgenden Betrachtung Gesamtwirkungsgrade für drei Verstromungsgrade (40, 50, 60 %) berechnet. In Abb. 3.3 ist zu erkennen, dass die dezentrale Stromerzeugung auf Basis synthetischer Brennstoffe erst bei sehr hohen elektrischen Wirkungsgraden Vorteile gegenüber der zentralen Stromproduktion aufweist. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass bei der Betrachtung des energetischen Gesamtwirkungsgrades keine Abwärmenutzung berücksichtigt wurde.



\* Verdichtung für CO<sub>2</sub>-Transport abgeschätzt

\*\* Mittelwert für verschiedene Vergasungsverfahren

Abb. 3.3: Gesamteffizienz der dezentralen Stromerzeugung für verschiedene Einsatzstoffe und Technologien (inkl. 0,3 % Transportverluste)

Bei der ebenfalls betrachteten Verstromung von eingespeistem Biogas (Abb. 3.4, Abb. 3.5) ergibt sich ein ähnliches Bild. Um hohe energetische Gesamtwirkungsgrade zu erreichen, muss eine ausreichende Nutzung der anfallenden Abwärme erfolgen. Außerdem ist zu beachten, dass die Ergebnisse von saisonalen und regionalen Schwankungen des Wärmebedarfs der Biogasanlagen abhängen.

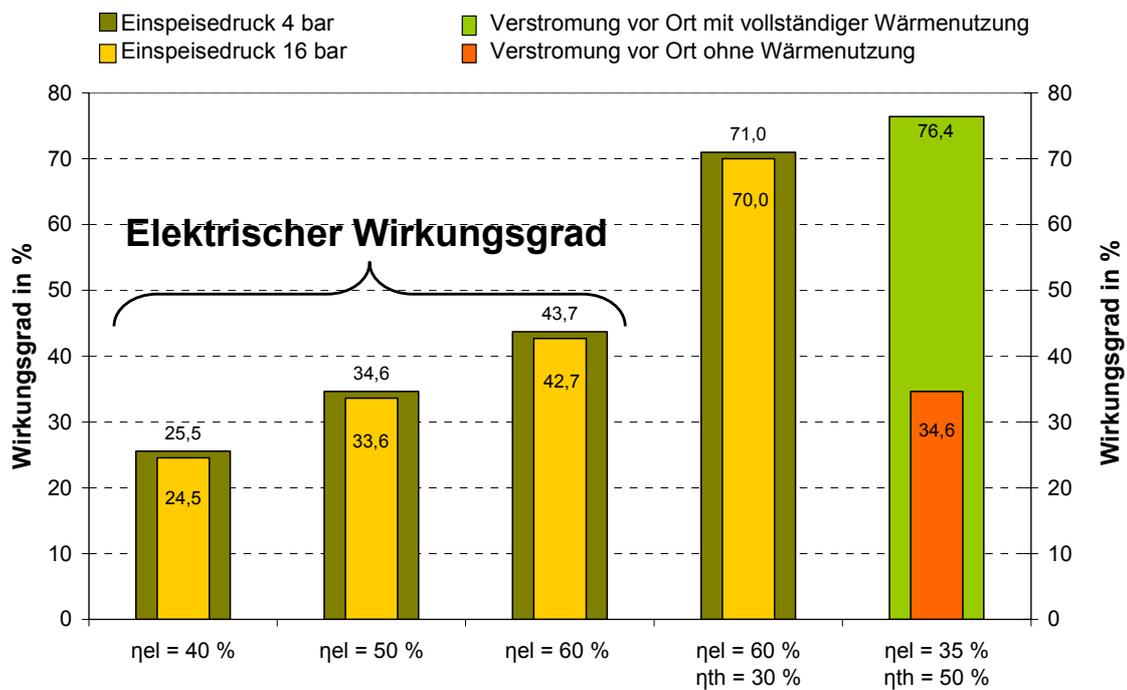


Abb. 3.4: Gesamteffizienz der dezentralen Stromerzeugung aus Biogas (direkt oder über Einspeisung, Winterbetrieb)

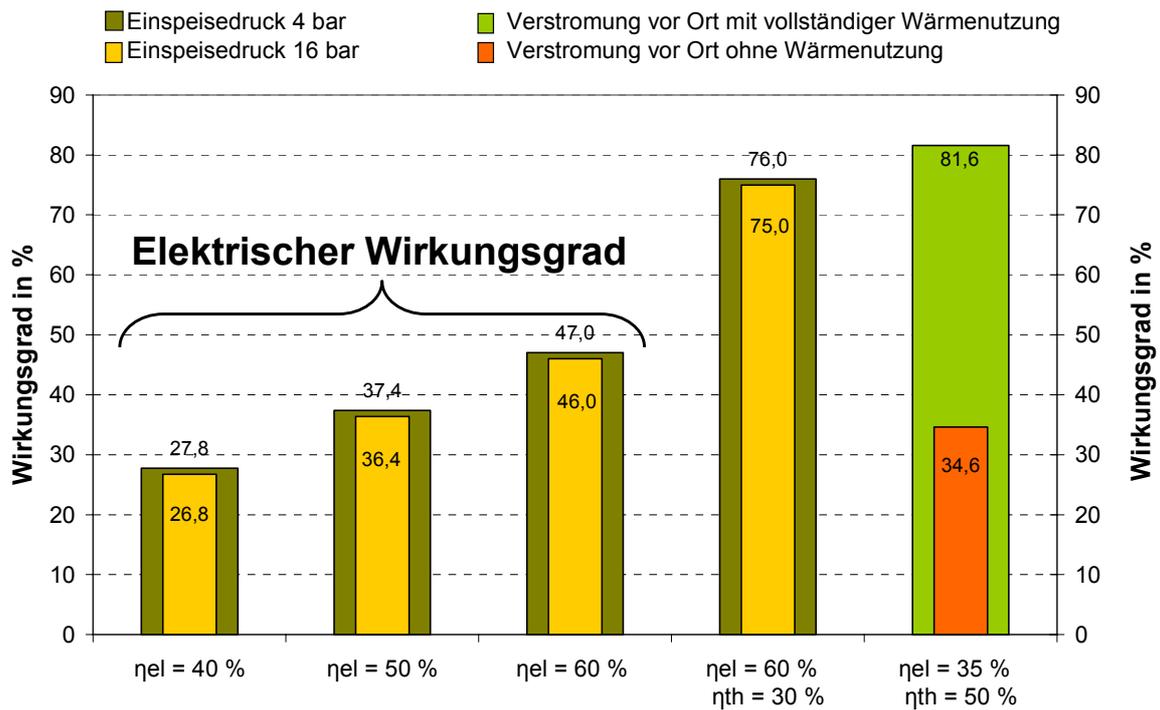


Abb. 3.5: Gesamteffizienz der dezentralen Stromerzeugung aus Biogas (direkt oder über Einspeisung, Sommerbetrieb)

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Kurzstudie sollte geklärt werden, ob die dezentrale Verstromung über die Einspeisung von SNG bzw. Wasserstoff energetisch höhere Gesamtwirkungsgrade ermöglicht als die zentrale Verstromung in Kohlekraftwerken. Hierzu wurden verschiedene Prozessketten zur zentralen Stromerzeugung und zur Gaserzeugung (SNG, H<sub>2</sub>) aus festen Brennstoffen (Kohle, Biomasse) hinsichtlich der erzielbaren Gesamtwirkungsgrade verglichen.

Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Abhängig vom elektrischen Wirkungsgrad der KWK-Technologie ergeben sich elektrische Gesamtwirkungsgrade zwischen 19 und 43 % bezogen auf die eingesetzte Primärenergie inklusive sämtlicher Hilfsenergien und unter Berücksichtigung von CCS-Technologie (bei fossilen Energieträgern).
2. Im Vergleich mit der als Referenzprozess herangezogenen Kohleverstromung durch IGCC mit CCS-Technologie, bei der auf Basis derzeitiger Erkenntnisse elektrische Gesamtwirkungsgrade zwischen 30 und 43 % realisiert werden können, liegen dezentrale KWK-Konzepte mit hohem elektrischen Wirkungsgrad in ähnlichen Bereichen.
3. KWK-Konzepte können deutliche Vorteile gegenüber der zentralen Verstromung erzielen, falls eine signifikante Abwärmenutzung ganzjährig möglich ist.

Für weiterführende Aussagen müssen umfangreiche Analysen vorgenommen werden, die sowohl Bedarfsstrukturen als auch detaillierte Betrachtungen von Anwendungstechnologien beinhalten. Außerdem sollten Exergiebilanzen erstellt werden, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu verbessern.

DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut  
Abteilung Gastechnologie

i. V.

Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Frank Graf

i. A.

Dr.-Ing. Siegfried Bajohr

## 5 Literatur

- [1] N.N., "Practical Experience gained during the first twenty years of operation of the great plains gasification plant and implications for future projects", U.S. Department of Energy, Office of Fossil Energy, (2006)
- [2] Lukes, A.: Experiences with Gasifying Low Rank Coals, Gasification Technology Conference San Francisco 2005
- [3] Hiller, H. et al.: Gas Production - Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. VCH-Verlagsgesellschaft mbH Weinheim (1989)
- [4] Schmalfeld, J. (Hrsg.): Die Veredelung und Umwandlung von Kohle: Technologien und Projekte 1970 - 2000 in Deutschland. DGMK Hamburg (2008)
- [5] Schäfer, W.; Heinrich, G.; Lohmann, C.; Peyrer, H.P.: Ruhr 100 - Neue Ergebnisse von der Weiterentwicklung der Lurgi-Druckvergasung. Erdöl und Kohle - Erdgas - Petrochemie, 36 (1983) 12, S. 557 - 562
- [6] Perna, A.: Combined power and hydrogen production from coal. Part A - Analysis of IGHP plants, Hydrogen Energy 33 (2008), S. 2957 - 2964
- [7] Cicconardi, S.P. et al: Combined power and hydrogen production from coal. Part B - Comparison between the IGHP and CPH systems, Hydrogen Energy 33 (2008), S. 4397 - 4404
- [8] Toonssen, R.; Woudstra, N.; Verkooijen, A.H.M.: Exergy analysis of hydrogen production plants based on biomass gasification. International Journal of Hydrogen Energy 33 (2008), S. 4074 - 4082
- [9] Schimkat, A.: Klimaschonende Verstromung fossiler Energieträger durch CO<sub>2</sub>-Abscheidung und-Speicherung ET 58 (2008) 6, S. 46 - 48
- [10] N.N.: Coal Gasification and IGCC in Europe. IEA Clean Coal Centre (2006)
- [11] Bine projektinfo 09/06, „Kraftwerke mit Kohlevergasung“  
[http://www.bine.info/fileadmin/content/Publikationen/Projekt-Infos/2006/Projekt-Info\\_09-2006/projekt\\_0906internet-x.pdf](http://www.bine.info/fileadmin/content/Publikationen/Projekt-Infos/2006/Projekt-Info_09-2006/projekt_0906internet-x.pdf)
- [12] Deschamps, C, et al.: Efficiency of an Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) power plant including CO<sub>2</sub>-removal, Energy 33 (2008), S. 874 - 881
- [13] AGFW-Report 2008, [www.agfw.de](http://www.agfw.de)