Neue Energiesysteme auf der Basis von Kohle

Autor(en): **Barnert, H.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **77 (1986)**

Heft 9

PDF erstellt am: **23.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-904198

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Neue Energiesysteme auf der Basis von Kohle

H. Barnert

Die bisherige Verwendung von Kohle in der offenen Verbrennung führt zu Umweltbeeinträchtigungen. Hier und bei der Abdeckung des zukünftigen Bedarfs an flüssigen Kohlenwasserstoffen, die eine wesentliche Funktion bei der Energiespeicherung haben, kann die Veredlung von Kohle Lösungsbeiträge leisten. Die Veredlung von Kohle unter Einsatz von Kernenergie in der Form von Hochtemperaturwärme aus dem Hochtemperaturreaktor eröffnet Möglichkeiten der Verbesserung der Wirtschaftlichkeit, der Umweltverträglichkeit, der Versorgungssicherheit und des Know-how-Gewinns in der Anlagentechnik.

La combustion ouverte du charbon est très polluante. L'affinage du charbon peut y remedier et également contribuer à assumer les futurs besoins en hydrocarbures liquides, importants pour une accumulation de l'énergie. Cet affinage, en utilisant de l'énergie nucléaire sous forme de chaleur à haute température, permet d'améliorer la rentabilité, de réduire la pollution, d'assurer le ravitaillement et d'accroître nos connaissances au sujet de telles installations.

Vortrag anlässlich der SEV-Informationstagung Energiespeicherung in Grossanlagen vom 20. März 1986 in Bern.

Adresse des Autors
Prof. Dr.-Ing. *Heiko Barnert*, Kernforschungsanlage Jülich GmbH, Institut für Reaktorentwicklung, Postfach 1913, D-5170 Jülich.

1. Einleitung

Die Speicherung von Energie stellt in der Energiewirtschaft einen wichtigen Teilbereich bei der Versorgung des Endverbrauchers mit Energie dar. Sie kommt praktisch in allen Stufen der Energiekette vor: Gewinnung der Primärenergieträger, Umwandlung in Sekundärenergieträger, Transport über grössere Entfernungen, Umwandlung in Nutzenergieträger, Verteilung und schliesslich Nutzung sowie Entsorgung. Indizien für die Bedeutung der Energiespeicherung sind die Schlagworte *Mittellast* und *Spitzenlast* bei der Stromversorgung und *abschaltbare Gasverträge* bei der Versorgung des Wärmemarkts im Bereich der Industrie und der Haushalte bzw. Kleinverbraucher. Die Zweckmässigkeit der Energiespeicherung, vor allem in wirtschaftlicher Hinsicht, ergibt sich aus der Notwendigkeit der zeitlichen Anpassung zwischen dem Endverbraucher und der Energiebereitstellung in den verschiedenen Stufen.

Strom lässt sich praktisch nicht speichern, deswegen fährt der Kraftwerkspark «Last-Folgebetrieb». In der Bundesrepublik Deutschland werden Braunkohlekraftwerke und Kernkraftwerke in Grundlast eingesetzt, Steinkohlekraftwerke werden in der Mittellast betrieben (ebenso wie z. B. Erdgaskraftwerke), während die Spitzenlast durch Heizöl- und Erdgaskraftwerke übernommen wird. Typische Durchschnittswerte für jährliche Einsatzdauern sind z. B.: Braunkohle 7000 h/a, Kernenergie 6100 h/a und Steinkohle 4300 h/a.

Kernenergie hatte in der Bundesrepublik Deutschland im Jahre 1984 einen Anteil von 24% an der Bruttostromerzeugung [1]. Neben den 19 in Betrieb befindlichen Kernkraftwerken sind 7 in Bau und 3 bestellt [2]. Allgemein wird davon ausgegangen, dass der Kernenergieanteil an der Stromerzeugung nicht sehr viel grösser werden kann und ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Kernenergiestrom und Kohlestrom erstrebenswert ist. Steinkohle ist derzeitig die Basis für den grössten Anteil, nämlich 34%, der Stromerzeugung in der Bundesrepublik Deutschland [3].

Der überwiegende Anteil der Aufgaben der Energiespeicherung wird heute weltweit offenbar durch Erdöl und seine Produkte Treibstoff und Heizöl übernommen. Daneben haben Erdölprodukte und Erdgas Eigenschaften, wie z. B. leichte Handhabbarkeit (auch durch Hausfrauen), Automatikbetrieb, derentwegen diese Endenergieträger auch als Komfortenergieträger bezeichnet werden.

Überzeugende Gründe für die Notwendigkeit der Produktion von Flüssigkohlenwasserstoffen auf der Basis fester Primärenergieträger leiten sich aus den Ergebnissen der IIASA[1]-Analysen [4] ab, wonach die Struktur des Endenergieeinsatzes sich kaum ändert, die relativen Anteile der verschiedenen Energieformen ziemlich gut gleichbleibend sind und der Beitrag flüssiger Kohlenwasserstoffe zur Endenergie auch in den nächsten 50 Jahren bei etwa 50% liegt. Dass dies so ist, hängt offensichtlich mit der hohen Nützlichkeit flüssiger Kohlenwasserstoffe in der Energieversorgung zusammen [5].

2. Bedeutung der Kohle für die Zukunft

Das absehbare Anwachsen der Weltbevölkerung von derzeit etwa 4 Milliarden Menschen auf etwa 8 Milliarden Menschen in den nächsten 5 Jahrzehnten einerseits und die Notwendigkeit der Steigerung des Lebensstandards für die zu entwickelnden

[1] IIASA = International Institute for Applied Systems Analysis

Regionen der Welt anderseits führen zu einem überproportionalen Anwachsen des Weltenergiebedarfs. Mit zwei Szenarien der IIASA-Analysen [4] sind in umfassenden Untersuchungen folgende Aussagen gemacht worden: Zukünftig werden die fossilen Primärenergieträger weiterhin sehr wichtig bleiben. Dies gilt insbesondere für Kohle, deren Einsatz mit etwa 2 Mia t SKE/a (Milliarden Tonnen Steinkohle-Einheiten pro Jahr)[2], entsprechend 25%, in den nächsten 5 Jahrzehnten um den Faktor 3 bis 5 ansteigen kann. Kernenergie kann einen bedeutenden Anteil übernehmen, die erneuerbaren Energieträger werden dagegen nur sehr langfristig eingesetzt werden.

Für die Europäischen Gemeinschaften ist letzthin bei der Formulierung der neuen energiepolitischen Ziele [6] in den sektoralen Bereichen festgestellt worden: «Feste Brennstoffe: Den Marktanteil der festen Brennstoffe erhalten und möglichst vergrössern; fortgesetzte Umstrukturierung der festen Brennstoffe produzierenden Industrien der Gemeinschaft.» Weiterhin: «Elektrizitätserzeugung: Ständige Priorität für die Verwendung von festen Brennstoffen und Kernkraft im Elektrizitätssektor, um sicherzustellen, dass 1995 nicht mehr als 10% der Elektrizität aus Kohlenwasserstoffen erzeugt werden. Im Jahr 1995 sollen etwa 40% der Elektrizitätserzeugung aus Kernkraft gewonnen werden.»

In der Bundesrepublik Deutschland ist die Kohlepolitik ein durchgängiges Thema der letzten Jahre. Letzthin hat Herr Bundesminister Dr. *Riesenhuber*, Bundesministerium für Forschung und Technologie, in der Energiedebatte des Deutschen Bundestages [7] unter anderem festgestellt: «Die Politik, die wir in der Regierung betreiben, ist eine Politik aus Kernkraft und Kohle...» Der Grund dafür ist, dass Kohle die einzige Ressource ist, die die Bundesrepublik als Bodenschatz besitzt.

3. Kohleveredlung

3.1 Konventionelle Kohleveredlung

In den letzten Jahren sind an vielen Stellen der Welt Forschungs-, Entwicklungs- und Erprobungsarbeiten für konventionelle Verfahren durchgeführt worden. Diese Verfahren bauen vielfach auf den Erfahrungen aus den Entwicklungsarbeiten und dem Betrieb grosstechnischer Anlagen der 30-/40er Jahre auf. Diese Verfahren werden hier als *«konventionell»* bezeichnet, weil die für die Umwandlung in Kohleveredlungsprodukte benötigten Prozessenergien aus dem Einsatzstoff Kohle selbst geliefert werden. Einige typische Beispiele:

Die Synthesegas-Anlage-Ruhr (SAR) zur Produktion von Synthesegas auf der Basis von Steinkohle (250 000 t/a) wird derzeitig in Oberhausen-Holten errichtet [8]. Eine Anlage zur Produktion von Synthesegas aus Braunkohle nach dem Hochtemperatur-Winkler-Verfahren ist derzeitig in Berrenrath in der Inbetriebnahmephase [9]. Mit der Kohle-Öl-Anlage Bottrop (250 t Steinkohle/d) wurden inzwischen mehr als 100 000 t Steinkohle hydriert [10].

Auf der Grundlage dieser drei Verfahren ist letzthin eine «Technikfolgenabschätzung für verschiedene Kohle-Kraftstoff-Optionen» [11] vorgestellt worden. Im Zusammenhang damit wurde entschieden, dass die Errichtung einer Grossanlage derzeitig nicht vorgenommen wird und dass weitere Verbesserungsmöglichkeiten in der Pilotanlage Bottrop erprobt und ihre Auswirkungen auf den Betrieb einer Grossanlage festgestellt werden sollen [12].

In diesem Zusammenhang ist festzustellen, dass es auch Bemühungen gibt, die Kohlevergasung zur Stromerzeugung einzusetzen. Beispiele dafür sind das Cool-Water-Projekt [13], bestehend aus der Hintereinanderschaltung einer Kohlevergasung nach Texaco und einem Kombi-Kraftwerk sowie die Steinkohlevergasung in kombinierten Gas-/Dampfturbinenkraftwerken [14].

3.2 Hochtemperaturreaktor zur Stromerzeugung

Kernenergie wird heute fast ausschliesslich zur Stromerzeugung eingesetzt. Die Entwicklung des Hochtemperaturreaktors (HTR) wurde und wird in einigen Ländern der Welt zunächst auch für die Stromerzeugung vorangetrieben. Dies ist technisch sinnvoll, weil die Dampferzeugung die einfachste Art der Wärmeauskopplung ist. Der HTR erzeugt aber auch höhere Temperaturen als zur Stromerzeugung notwendig. Deswegen ist der Einsatz von Kernenergie in der Form von Hochtemperaturwärme aus dem HTR für Prozesswärmeanwendungen sinnvoll.

Der HTR mit kugelförmigen Brennelementen ist in der Bundesrepublik Deutschland in Zusammenarbeit mit anderen Ländern, darunter der Schweiz, entwickelt worden. Der Stand der Entwicklung wird durch den langjährigen Betrieb des AVR[3] in Jülich [15] und durch die Inbetriebnahme des THTR (Thorium-HTR) in Schmehausen bei Hamm [16; 17] gekennzeichnet. Beispiele für die HTR-Entwicklung in anderen Ländern bzw. die Zusammenarbeit sind die Arbeiten in den USA [18], der Sowjetunion [19], in Japan [20] und in der Schweiz [21].

Die Markteinführung des HTR zur Stromerzeugung wird derzeitig durch das Planungsprojekt HTR-500 in der Bundesrepublik Deutschland in Zusammenarbeit mit der Schweiz vorbereitet [22]. Nach einer Untersuchung der Arbeitsgemeinschaft Hochtemperaturreaktor [23] wird für den HTR-500 angenähert Kostengleichheit mit dem grossen Druckwasserreaktor erwartet.

Neben dieser Entwicklungs- und Markteinführungsstrategie ist diejenige der kleinen HTR-Anlagen zu nennen, mit der einige grundsätzliche Neuerungen in die Kerntechnik eingeführt werden. Das Konzept des HTR-Moduls von KWU/Interatom[4] [24; 25] hat erstmals die neuartigen Eigenschaften solcher Anlagen entwickelt und aufgezeigt; es werden heute HTR-Modulkraftwerksanlagen angeboten. Das Konzept des HTR-100-Industriekernkraftwerks [26] folgt dieser Linie und wird heute ebenfalls industriell angeboten. Das Konzept des HTR-Moduls bzw. des HTR-100 nutzt neben den HTR-spezifischen Sicherheitseigenschaften die Sicherheitsvorteile kleiner Reaktoren: Selbst bei Ausfall der für die Nachwärmeabfuhr benutzten Betriebssysteme wird die Nachwärme durch Strahlung, Konvektion und Leitung nach aussen abgeführt, ohne dass die Temperaturen im Inneren auf unzulässige Werte ansteigen. Weitere gewichtige Argumente sind: Werkstattfertigung, Fertigung in Kleinserien, kurze Bauzeit, Flexibilität im Aufbau und anderes mehr.

3.3 Verfahren der Kohlevergasung mit HTR

Bei den Verfahren der Kohlevergasung mit HTR-Wärme, im Gegensatz

[2] 1 t SKE = 1 Tonne Steinkohlen-Einheiten = 29,3 GJ

[3] AVR = Arbeitsgemeinschaft Versuchs-Reaktor

[4] KWU = Kraftwerk-Union

zu den konventionellen Verfahren auch allotherme Verfahren genannt, wird die für den Prozess der Umwandlung von Kohle in Gase benötigte Prozesswärme als Hochtemperaturwärme aus dem HTR in einem Temperaturbereich bis zu 1000 °C eingekoppelt. Dabei werden grundsätzlich zwei Prozessvarianten unterschieden, nämlich die hydrierende Kohlevergasung und die Wasserdampfkohlevergasung [27]. Die Prozessführung der beiden Prozessvarianten lautet vereinfacht:

Hydrierende Kohlevergasung

1)	$1{,}2\times(CH+1{,}5\,H_2 = CH_4)$	HKV
2)	$1{,}2\times(CH_4+H_2O = 3\,H_2+CO)$	RSO
3)	$0{,}2\times(CO+H_2O = H_2+CO_2)$	CON
4)	$1{,}0\times(CO+2H_2 = CH_3OH)$	MES
	$1{,}2\,CH+1{,}4\,H_2O = CH_3OH+0{,}2\,CO_2$	

Wasserdampf-Kohlevergasung

1)	$1{,}2\times(CH+H_2O = 1{,}5\,H_2+CO)$	WKV
2)	$0{,}2\times(CO+H_2O = H_2+CO)$	CON
3)	$1{,}2\times(CO+2\,H_2 = CH_3OH)$	MES
	$1{,}2\,CH+1{,}4\,H_2O = CH_3OH+0{,}2\,CO_2$	

RSO: Röhrenspaltofen
HKV: Hydrierende Kohlevergasung
WKV: Wasserdampf-Kohlevergasung
CON: Konvertierung
MES: Methanolsynthese

Die Prozessfolge ist hier so dargestellt, dass in beiden Prozessvarianten aus Kohle (CH) unter Einsatz von Wasser und Hochtemperaturwärme aus dem HTR schliesslich der Flüssigkohlenwasserstoff Methanol (CH_3OH) und Kohlendioxid produziert wird.

Die hauptsächlichen wärmeaufnehmenden Reaktionen sind im Falle der hydrierenden Kohlevergasung die Reaktion der «Wasserdampf-Methan-Spaltung im Röhrenspaltofen (RSO)» und bei der Wasserdampf-Kohlevergasung die Reaktion der «Wasserdampf-Kohle-Reaktion» im Wasserdampf-Kohle-Vergasungs-Gasgenerator (WKV).

Die energiewirtschaftliche Attraktivität des Einsatzes von Kernenergie zur Kohleveredlung besteht darin, dass gegenüber konventionellen Verfahren der Produktertrag verdoppelt wird: Während bei konventionellen Verfahren aus einer Energieeinheit Kohle etwa 0,5 bis 0,6 Energieeinheiten Produkt entstehen, können bei einem Kohleveredlungsverfahren mit Kernenergie aus einer Energieeinheit Kohle schliesslich etwa 1 bis 1,2 Energieeinheiten Produkt produziert werden [28]. Aus dieser Erhöhung des Produktertrags um den Faktor 2 resultiert das Potential zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit bei der Produktion von Kohleveredlungsprodukten.

3.4 Stand der Entwicklung der Kohleveredlung mit HTR-Wärme

Die Zielsetzung des Anfang der 70er Jahre initiierten Projekts «Prototypanlage Nukleare Prozesswärme» (PNP) ist

- die Anpassung des HTR mit Kugelhaufenreaktor an die Erzeugung von Prozesswärme auf einem Temperaturniveau bis zu 950 °C und
- die Entwicklung und Erprobung der für die Wärmeauskopplung benötigten Komponenten, sowie
- die Entwicklung und Erprobung der hydrierenden (HKV) und der Wasserdampf-(WKV-)Kohle-Vergasung.

In der Zwischenzeit wurden grosse Fortschritte in der Forschungs- und Entwicklungsarbeit gemacht: Einzelne Bausteine sind im halbtechnischen und teilweise pilottechnischen Massstab entwickelt [29]; die Notwendigkeit und Richtung der Fortsetzung der Entwicklungsarbeit ist aufgezeigt [30].

Im einzelnen kann der derzeitige Stand der Arbeiten an den folgenden Beispielen wesentlicher Bausteine aufgezeigt werden:

- Die hydrierende Vergasung (HKV) wurde im 1. Schritt in der halbtechnischen Anlage erfolgreich erprobt [31]; derzeitig ist die Pilotanlage HKV mit Braunkohle in Betrieb [9],
- die Wasserdampf-Kohle-Vergasung (WKV) wurde in einer halbtechnischen Anlage erfolgreich erprobt [32]; derzeitig wird eine umfassende Studie über die Vergasung von Steinkohle durchgeführt,
- derzeitig erfolgt die experimentelle Erprobung von Prototypen der wärmeauskoppelnden Komponenten: Röhrenspaltofen [33], Helium-Helium-Wärmeübertrager, Heissgasleitung und anderes mehr [34],
- die Qualifikation der metallischen Hochtemperaturwerkstoffe ist soweit fortgeschritten, dass heute z. B. für den Röhrenspaltofen Standzeiten von etwa 100 000 h und für den WKV-Gasgenerator von etwa 60 000 h als abgesichert gelten [35].

In der derzeitig laufenden ingenieurtechnischen Bewertung [30] ergeben sich Aspekte der möglichen Optimalisierung und Potentiale für weitere Verbesserungen. Ein wichtiger Gesichtspunkt sind dabei die metallischen Wärmeübertragungsflächen der wärmeaufnehmenden Apparate und die potentielle Möglichkeit, diese zukünftig durch keramische Werkstoffe zu ersetzen. In diesem Falle würde das Temperaturpotential des HTR weiter ausgeschöpft werden können [36], was insgesamt zu einer weiteren Verbesserung der Wirtschaftlichkeit der Verfahren führen kann.

3.5 Verbund von Kohle, Stahl und Kernenergie

Seit etwa zwei Jahren wird der Vorschlag «Verbund von Kohle, Stahl und Kernenergie» diskutiert. Dieses Konzept fasst die Vorteile aus den bisherigen Entwicklungsergebnissen und die erwarteten Erfolge zukünftiger Entwicklungsarbeit zusammen und bildet so die Möglichkeit zu Grundsatzinnovationen in den Bereichen Kohle und Stahl [37].

Das Verbundsystem produziert Methanol und Roheisen auf der Basis von Kohle, Erz mit Zuschlägen und Kernenergie. Es besteht aus den folgenden Techniken:

- Teilvergasung von Kohle und Herstellung von Gas und Feinkoks bei Einkopplung von Hochtemperaturwärme aus dem HTR,
- Reduktion von Erz mit Feinkoks zur Herstellung von Roheisen und Konvertergas im Eisenbadverfahren, sowie
- gemeinsame Verwendung der Produktgase zur Synthese von Methanol.

Wirtschaftlichkeitsvorteile ergeben sich im «Verbund» durch den Einsatz von Kernenergie, durch Teilvergasung im Vergasungsschritt sowie durch die wertgesteigerte Verwendung der Zwischenprodukte Feinkoks und Gas. Der Verbund [37] aus dem Wasserdampf-Kohle-Vergasungs-Verfahren (WKV) und dem Klöckner-Stahl-Gas-Verfahren (KSG) ergibt für Verhältnisse in der Bundesrepublik Deutschland als Kosten für die Produkte auf der Basis von Steinkohle zu 257 DM/t für Methanol etwa 500 DM/t und gekoppelt für Roheisen etwa 370 DM/t.

In dieser Wirtschaftlichkeitsrechnung wurde als Kohleveredlungsprodukt Methanol gewählt, weil Methanol als Ersatz für Vergasertreibstoff in der Form von «M 100» (93% Methanol, 7% höhere Kohlenwasserstoffe) vielfach diskutiert ist.

Unter den Bedingungen in der Bundesrepublik Deutschland in den Jahren 1984 und 1985 ergab sich für die oben angegebenen Kostenzahlen (und

bei Einrechnung von Verbesserungen über den Wirkungsgrad der Nutzung von Methanol in Motoren) insgesamt eine wirtschaftliche Attraktivität. Unter den Bedingungen des Ölpreiseinbruchs, wie er seit Anfang 1986 stattfindet, ist die Wirtschaftlichkeit dann allerdings nicht mehr gegeben. Es wird jedoch allgemein davon ausgegangen, dass die Ölpreise in Zukunft wieder anziehen werden [38].

Auf der Basis der bisherigen Entwicklungsergebnisse der Kohleveredlungsverfahren mit HTR-Wärme und aufgrund der Tatsache, dass Kernenergiestrom in der Bundesrepublik Deutschland preiswerter ist als Steinkohlestrom, ergibt eine prinzipielle Abschätzung, dass Produkte aus der Kohleveredlung mit HTR-Wärme um etwa 25% preiswerter sein können als Kohleveredlungsprodukte aus konventionellen Verfahren [39].

Angesichts der guten Erfolgsaussichten bezüglich der wirtschaftlichen Attraktivität und angesichts des hohen Entwicklungspotentials auf der Basis der erfolgreichen Experimente in der halbtechnischen Anlage wird für das weitere Forschungs- und Entwicklungsprogramm vorgeschlagen [37]: Das Verfahren der Wasserdampf-Kohle-Vergasung von Steinkohle sollte in der Verfahrensweise der «Teilvergasung» unter Nutzung der bis jetzt vorhandenen Versuchseinrichtungen «zeitverkürzt» zur kommerziellen Grösse geführt werden. Dabei könnte die Systemerprobung der Auskopplung von Hochtemperaturwärme und der Einkopplung in den WKV-Gasgenerator am erweiterten AVR-Reaktor in Jülich erfolgen [40].

4. Neuartige horizontal integrierte Energiesysteme

Mit dem Konzept der «neuartigen horizontal integrierten Energiesysteme» [41] wird eine grundlegende Betrachtung von Aufgabenstellungen der zukünftigen Energieversorgung vorgeschlagen. In einer verallgemeinerten Betrachtung stellt sich heraus, dass das Hauptproblem der zukünftigen Energiewirtschaft die Behandlung der Emissionen ist, die mit der grosstechnischen Nutzung fossiler Brennstoffe durch Verbrennung entstehen.

Die Behandlung dieser Emissionen ist in zwei Stufen zu sehen. Eine kurzfristig dringliche Notwendigkeit ist die Rückhaltung von Schwefeldioxid und Stickoxiden. Des weiteren müssen andere Stoffe, wie beispielsweise Schwermetalle, berücksichtigt werden. Eine längerfristige Notwendigkeit ist die Betrachtung der Emissionen von Kohlendioxid, weil dieses Gas zusammen mit anderen eine potentielle Gefahr für das Klima der Erde darstellt.

Die grundlegenden Betrachtungsweisen in dem Konzept sind in den folgenden drei Leitgedanken zusammengefasst:

- Zerlegung der Eingangsstoffe eines Energiesystems und Reinigung, insbesondere der fossilen Primärenergieträger,
- stöchiometrische Zuordnung auf den Endverbrauch bei weitgehendem Energieverbund (horizontale Integration)
- Synthese und Umwandlung bei Nutzung der Austauschbarkeit der Einsatzbrennstoffe.

Das wesentliche Ergebnis einer vorläufigen Analyse zum neuartigen horizontal integrierten Energiesystem ist, dass auf der Basis heute vorhandener Techniken die Aufgaben der Energieversorgung in den nächsten Jahrzehnten, auch unter Anlegung erhöhter Anforderungen an die Umweltverträglichkeit, grundsätzlich gelöst werden können. Diese Aussage wird durch weitergehende systemanalytische Untersuchungen [42], die derzeitig in der Kernforschungsanlage Jülich durchgeführt werden, weiter ausgebaut.

5. Zusammenfassung

1. Die Speicherung von Energie stellt einen wichtigen Teilbereich in der Energieversorgung dar. Indizien dafür sind die Schlagworte *Mittellastbereich* bei der Stromversorgung und *abschaltbare Gasverträge* bei der Wärmeversorgung.

2. Flüssige Kohlenwasserstoffe sind offenbar die am besten geeigneten Energiespeicherstoffe. Sie sind «stapelbar».

3. Kohle ist heute und vermehrt in Zukunft ein sehr wichtiger Primärenergieträger.

4. Kohleveredlung in Kohlenwasserstoffe, insbesondere Flüssig-Kohlenwasserstoffe, wird in vielen Ländern der Welt als Forschungs-, Entwicklungs- und Erprobungsaufgabe durchgeführt.

5. Der Verbund von Kohle und Kernenergie eröffnet Möglichkeiten zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit, der Umweltverträglichkeit, der Versorgungssicherheit und des Know-how-Gewinns in der Anlagentechnik.

6. Die Entwicklung der Verfahren zu Kohlevergasung mit HTR-Wärme hat grosse Fortschritte gemacht: Viele Bausteine sind halbtechnisch und pilottechnisch entwickelt.

7. Der nächste Schritt in der Entwicklung der Kohleveredlung mit HTR-Wärme ist die Systemerprobung, so dass Marktreife Mitte der 90er Jahre erreicht werden kann.

8. Der Vorschlag «Verbund von Kohle, Stahl und Kernenergie» fasst die Vorteile der Systeme zusammen und ermöglicht Grundsatzinnovationen in den Bereichen Kohle und Stahl.

9. Das Konzept der neuartigen horizontal integrierten Energiesysteme betrachtet die Grundfragen einer zukünftigen Energiewirtschaft verallgemeinert unter den drei Leitgedanken:

- Zerlegung der Eingangsstufe und Reinigung,
- stöchiometrische Zuordnung und
- Synthese und Umwandlung.

Literatur

[1a] *J. Vogel* und *R. Riethmüller:* Der SNR-300 vor der Inbetriebsetzung. Atomwirtschaft/Atomtechnik 30(1985)8/9, S. 453...461.

[1b] *H.-W. Schiffer:* Kernenergie in der Elektrizitätswirtschaft der BR Deutschland 1984. Atomwirtschaft/Atomtechnik 30(1985)11, S. 576...580.

[2] Faktenpapier zur Kernenergie. Bonn, Deutsches Atomforum e.V., Juli 1985; S. 20.

[3] Steinkohle. Daten und Tendenzen. Essen, Gesamtverband des Deutschen Steinkohlenbergbaus, 1984/85; Tafel 22.

[4] *W. Häfele:* Energy in a finite world. Vol 2: A global systems analysis. Report by the energy systems program group of the international institute for applied systems analysis. (IIADA). Cambridge/Massachusetts, Ballinger Publishing Company, 1981.

[5] *W. Häfele, H. Barnert* und *W. Sassin:* Künftige fossile Brennstoffe, ihre Nutzung und Einbettung in moderne Energiesysteme. Festvortrag an der Jahreshauptversammlung der Deutschen Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt e.V, (DFVLR) Stuttgart, 26. November 1981.

[6] Neue energiepolitische Ziele für die Gemeinschaft. (Kommission der Europäischen Gemeinschaften). Energie in Europa -(1985)2, S. 8.

[7] *H. Riesenhuber:* Beitrag zur Energiedebatte des Deutschen Bundestages. Plenarprotokoll 10/171, S. 12786 vom 7. November 1985. Bonn, Deutscher Bundestag, Presse- und Informationszentrum.

[8a] *R. Specks:* Die Chancen der Kohlenvergasung. Glückauf 114(1978)3, S. 137...142.

[8b] Entwicklungsstand der neuen Technologien der Kohlenvergasung und Kohlenverflüssigung. Glükkauf 119(1983)23, S. 1147...1159.

[9] *H. Teggers:* Vergasung und Verflüssigung von Braunkohle. Braunkohle 37(1985)9, S. 390...393.

[10] Geschäftsbericht 1984 der RAG Ruhrkohle Öl und Gas GmbH, Essen.

[11] Technikfolgenabschätzung für verschiedene Kohle-Kraftstoff-Optionen. Vorlage zur Präsentation im Bundesministerium für Forschung und Technologie am 6.3.1986. Karlsruhe, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Abteilung für Angewandte Systemanalyse (AFAS), 1986.

[12] Langfristige Chancen der Kohleverflüssigung. Pressemitteilung des Bundesministers für Forschung und Technologie, Bonn, 6. März 1986.

[13] *S.D. Alpert* and *M.J. Gluckmann:* Coal gasification systems for our generation. Report of the Electric Power Research Institute, Palo Alto/California.

[14] Kohledruckvergasung. Steinkohlevergasung in kombinierten Gas-/Dampfturbinenkraftwerken. Schriftenreihe: Energie-Politik in Nordrhein-Westfalen, Band 12, 1981.

[15] *C. Marnert* und *E. Ziermann:* Erfahrungen beim Betrieb des AVR-Versuchskernkraftwerks. VGB-Sondertagung «Kohleumwandlung und Hochtemperaturreaktor: Bausteine neuer Energiekonzepte» Dortmund, 16...19. September, 1985. Essen, Technische Vereinigung der Grosskraftwerksbetreiber e.V., 1985.

[16] 300-MW-Kernkraftwerk mit Thorium-Hochtemperaturreaktor (THTR 300) der HKG in Hamm-Uentrop. Druckschrift Nr. D HRB 1429 84 D. Mannheim, Brown Boveri & Cie AG, Hochtemperatur-Reaktorbau GmbH, Nukem GmbH, 1985.

[17] *E. Baust:* Hochtemperaturreaktoren. Inbetriebnahme des THTR-300. Atomwirtschaft/Atomtechnik 30(1985)8/9, S. 422...427.

[18] *P. Kasten:* Status und Aussichten der HTR-Forschung und Entwicklung in den USA. VGB-Sondertagung «Kohleumwandlung und Hochtemperaturreaktor: Bausteine neuer Energiekonzepte» Dortmund, 16...19. September, 1985. Essen, Technische Vereinigung der Grosskraftwerksbetreiber e.V., 1985.

[19] *V.N. Grebennik:* Status of works on gas-cooled reactors in the USSR. VGB-Sondertagung «Kohleumwandlung und Hochtemperaturreaktor: Bausteine neuer Energiekonzepte» Dortmund, 16...19. September, 1985. Essen, Technische Vereinigung der Grosskraftwerksbetreiber e.V., 1985.

[20] *T. Aochi:* Stand der VHTR-Entwicklung in Japan. VGB-Sondertagung «Kohleumwandlung und Hochtemperaturreaktor: Bausteine neuer Energiekonzepte» Dortmund, 16...19. September, 1985. Essen, Technische Vereinigung der Grosskraftwerksbetreiber e.V., 1985.

[21] *G. Sarlos:* Überblicke über die HTR-Arbeiten in der Schweiz. VGB-Sondertagung «Kohleumwandlung und Hochtemperaturreaktor: Bausteine neuer Energiekonzepte» Dortmund, 16...19. September, 1985. Essen, Technische Vereinigung der Grosskraftwerksbetreiber e.V., 1985.

[22] *E. Baust:* Die technische Konzeption und Auslegung des HTR-500. VGB-Sondertagung «Kohleumwandlung und Hochtemperaturreaktor: Bausteine neuer Energiekonzepte» Dortmund, 16...19. September, 1985. Essen, Technische Vereinigung der Grosskraftwerksbetreiber e.V., 1985.

[23] HTR-500 Vorprojektuntersuchung, Zusammenfassung 1984. Arbeitsgemeinschaft Hochtemperaturreaktor: Hochtemperaturreaktor-Reaktorbau GmbH / Ruhrgas AG / Ruhrkohle AG / Vereinigte Elektrizitätswerke Westfalen AG.

[24] Der HTR-Modul. Druckschrift Nr. 79012.0S/85. Mülheim a.d. Ruhr, Kraftwerk Union AG / Bergisch Gladbach, Interatom, 1985.

[25] *H. Reutler:* Konzept des modularen HTR in Zweibehälterbauweise. Atomwirtschaft / Atomtechnik 30(1985)8/9, S. 433...436.

[26] Technische Konzeption des HTR-100 MW in vorgefertigter Bauweise. Mannheim, Brown Boveri & Cie AG / Hochtemperatur-Reaktorbau GmbH, März 1984.

[27] *H. Barnert* und *R. Schulten:* Der Hochtemperaturreaktor. In: Perspektiven der Kernenergie. Jül-Conf-32. Jülich, Kernforschungsanlage Jülich GmbH, Februar 1984.

[28] *H. Barnert, C.B. von der Decken* and *K. Kugeler:* The HTR and nuclear process heat applications. Nuclear Engineering and Design 78(1984)–, p. 91...98.

[29] *I. Weisbrodt:* Übersicht über das Projekt nukleare Prozesswärme (PNP). VGB-Sondertagung «Kohleumwandlung und Hochtemperaturreaktor: Bausteine neuer Energiekonzepte» Dortmund, 16...19. September, 1985. Essen, Technische Vereinigung der Grosskraftwerksbetreiber e.V., 1985.

[30] *R. Specks:* Kohle und Kernenergie. Wintertagung des Deutschen Atomforums 1986: Kernenergie für die nächste Generation. Bonn, 28. Januar 1986.

[31] *H.-J. Scharf, L.Schrader* and *H. Teggers:* Results from the operation of a semitechnical test plant for brown coal hydrogasification. Nuclear Engineering and Design 78(1984)–, p. 223...231.

[32] *R. Kirchhoff* a.o.: Operation of a semi-technical pilot plant for nuclear aided Nuclear Engineering and Design 78(1984)–, p. 233...239.

[33] *R. Harth* a.o.: Vorstellung der Versuchsanlage EVA-II und ihre Aufgabenstellung. Symposium «Hochtemperatur-Reaktor-Komponenten». Düsseldorf, Ministerium für Wirtschaft, Mittelstand und Verkehr in Nordrhein-Westfalen, Januar 1985.

[34] *W. Jansing:* Vorstellung der KVK-Anlage und ihre Aufgabenstellung. VGB-Sondertagung «Kohleumwandlung und Hochtemperaturreaktor: Bausteine neuer Energiekonzepte» Dortmund, 16...19. September, 1985. Essen, Technische Vereinigung der Grosskraftwerksbetreiber e.V., 1985.

[35] *H. Nickel, F. Schubert* und *H.-J. Penkalla:* Stand der Qualifikation der Werkstoffe für den HTR. VGB-Sondertagung «Kohleumwandlung und Hochtemperaturreaktor: Bausteine neuer Energiekonzepte» Dortmund, 16...19. September, 1985. Essen, Technische Vereinigung der Grosskraftwerksbetreiber e.V., 1985.

[36] *R. Schulten:* Gelöste und noch zu lösende Probleme bei der Entwicklung von Hochtemperaturreaktoren und von Verfahren zur Nutzung der HTR-Wärme. VGB-Sondertagung «Kohleumwandlung und Hochtemperaturreaktor: Bausteine neuer Energiekonzepte» Dortmund, 16...19. September, 1985. Essen, Technische Vereinigung der Grosskraftwerksbetreiber e.V., 1985.

[37] Verbund von Kohle, Stahl und Kernenergie, Wirtschaftlichkeitsrechnung. Arbeitsergebnisse als Bericht für das 3. Treffen des «Verbund-Gesprächkreises», 27. Juni 1984.

[38] *R. von Benningsen-Foerder:* Energie: Wohin geht der Weg? Wintertagung des Deutschen Atomforums 1986: Kernenergie für die nächste Generation. Bonn, 28. Januar 1986.

[39] *H. Barnert:* On the potential of the improvement of a competitiveness of coal refinement processes by application of HTR process heat. To be presented at the CEC-Meeting of the «HTR Economics and Market Working Party» Brussels, December 3, 1985.

[40] Umbau des AVR-Reaktors zu einer Prozesswärmeanlage, Ergebnisse der Vorplanungsphase. Jülich, Kernforschungsanlage Jülich GmbH, Juni 1985.

[41] *W. Häfele* u.a.: Zur zukünftigen Energieversorgung: Das Konzept der neuartigen, horizontal integrierten Energiesysteme. Energiewirtschaftliche Tagesfragen 78(1984)1, S. 17...24.