

Umwandlungssektor (TP 4)

Prof. Dr.-Ing. **A. Voß**, **U. Fahl** und **D. Hermann**, Stuttgart

Zusammenfassung

Die möglichst umfassende und konsistente datenmäßige Beschreibung des Umwandlungssektors ist wegen dessen herausragender Bedeutung für eine künftige Minderung vor allem von CO₂-Emissionen eine wesentliche Voraussetzung zur Bestimmung zweckmäßiger Minderungsstrategien. Im Vordergrund stehen dabei eine hinreichend große Breite und Detailliertheit der Beschreibung sowie eine möglichst vielseitige Verwendbarkeit des Instrumentariums. Aufmerksamkeit verdient des weiteren die Flexibilität gegenüber Veränderungen energiewirtschaftlicher Rahmenbedingungen. Anhand von Beispielen werden erste Ergebnisse und Erfahrungen der Datenerhebung vorgestellt sowie Schlußfolgerungen für die weitere Komplettierung und künftige Nutzung der Datenbasis gezogen.

1 Rolle und Besonderheiten der Minderung energiebedingter Treibhausgas-Emissionen im Umwandlungssektor

Der Umwandlungssektor umfaßt die Gesamtheit der Prozesse, bei denen ein gegebenes Spektrum von Primärenergieträgern in mehr oder minder zentralisierten Anlagen unter Inkaufnahme von Umwandlungsverlusten und Eigenverbräuchen für die Bedürfnisse Dritter in die jeweils gewünschten Energieformen umgewandelt und verteilt wird. Bezogen auf CO₂, das wichtigste energiebedingte Treibhausgas, sind die dem Umwandlungssektor direkt zuordenbaren Emissionen proportional dem Produkt von Kohlenstoffintensität und energetischem Umsatz fossiler Brennstoffe für die Strom-, Wärme- und gegebenenfalls Wasserstoffherzeugung bzw. zur Deckung der entsprechenden Umwandlungsverluste und Eigenverbräuche bei sonstigen Brennstoffveredelungs-, transport- und verteilungsprozessen, solange eine CO₂-Rückhaltung und Entsorgung nicht möglich ist bzw. ausgeschlossen werden kann. Gleichzeitig hat der Umwandlungssektor nicht unwesentlichen Einfluß auf die Kostengünstigkeit der bereitgestellten Endenergieträger und entscheidet demzufolge indirekt mit über die Kohlenstoffintensität des Endenergieverbrauchs.

Eine Verringerung energiebedingter CO₂-Emissionen sollte grundsätzlich an allen Prozessen der Energiegewinnung, -umwandlung und des -verbrauchs ansetzen. Dabei kommt dem Umwandlungssektor wegen seines bedeutenden Gewichtes (gegenwärtig entfallen in Deutschland rund 45 % der energiebedingten CO₂-Emissionen auf diesen Bereich, siehe Abb. 1) und seiner Funktion als Bindeglied zwischen Primär- und Endenergie eine entscheidende Rolle zu. Während wegen des hohen Anteils fossiler Brennstoffe zunächst vor allem eine Verringerung von Umwandlungsverlusten und Eigenverbräuchen im Vordergrund steht, erscheint auf längere Sicht der Übergang zu überwiegend nichtfossilen, kohlenstofffreien Primär- und Endenergieträgern unvermeidbar. Hierfür sind besonders im Umwandlungssektor weitreichende technologische und infrastrukturelle Vorleistungen zu erbringen. Dabei ist aber zu berücksichtigen, daß die Aspekte der CO₂-Minderung nicht allein maßgebend sind, sondern daß in aller Regel die gesellschaftlichen Anforderungen an die technische und Versorgungssicherheit sowie Wirtschaftlichkeit der Energieversorgung gleiche und größere Bedeutung

haben. Nur als hypothetischer Grenzfall wäre denkbar, daß bei einer dramatischen Verschärfung des globalen CO₂-Problems kostenintensive Crash-Programme zur Verringerung der Emission durchsetzbar sind. Bei im wesentlichen konstanten Rahmenbedingungen und einem hierfür technisch erprobten sowie ökonomisch weitgehend optimierten Energieversorgungssystem gibt es eher geringe wirtschaftliche Spielräume für Minderungsmaßnahmen. Deren praktische Umsetzung ist weitgehend an laufende Rationalisierungsmaßnahmen, an unerläßliche Ersatzinvestitionen und, soweit relevant, an die Deckung von Bedarfszuwächsen gekoppelt. Zur Identifikation entsprechend geringer Spielräume bedarf es unter besagten Bedingungen hinreichend detaillierter und empfindlicher Instrumentarien und Daten.

Eine andere Situation ergibt sich, wenn sich die wirtschaftlichen und politischen Rahmenbedingungen für die Energieversorgung in stärkerem Maße verändern. So können sich die anhaltend großen Produktivitätsgewinne industrieller Fertigung auf heute offeneren Weltmärkten rascher ausbreiten. Sie werden bei hinreichender Breite unvermeidlich auf die Preisrelationen industrieller Fertigprodukte zu den Rohstoffen und Energieträgern, d. h. letztlich auf die gegenwärtigen Strukturen globaler Arbeitsteilung durchschlagen. Im Ergebnis dessen gibt es aber auch die Chance, daß die politische Blockade der Kernenergie überwunden und die strategische Reserverolle der heimischen Kohle relativiert wird. Die Anpassung des Energiesystems an derart veränderte Bedingungen bietet u. U. erhebliche Möglichkeiten zur Implementierung von CO₂-Minderungsmaßnahmen. Allerdings ist zu berücksichtigen, daß veränderte Rahmenbedingungen gegebenenfalls auch eine weitgehende Neubewertung der einzelnen Minderungsmöglichkeiten verlangen werden. D. h. in diesem Falle sind entsprechende Anforderungen vor allem an die Flexibilität des Instrumentariums zu richten, um rasch und sachgerecht auf solche Veränderungen reagieren zu können.

Im Rahmen des IKARUS-Projektes wird von einer mehr extrapolativen Sichtweise ausgegangen, die weniger starke und allmähliche Veränderungen unterstellt. Im Rahmen des Teilprojektes "Daten: Umwandlungssektor" kann diesen dadurch Rechnung getragen werden, daß unterschiedlichste, darunter auch futuristische Technolo-

gien berücksichtigt werden, die darüber hinaus für die betrachteten Modelljahre 1989, 2005 und 2020 technisch-ökonomisch unterschiedlich bewertet werden können.

2 Aufgabenstellung im Teilprojekt "Daten: Umwandlungssektor"

Zielstellung des Teilprojektes ist es, die im Zusammenhang mit der Emission von CO₂ und anderen Treibhausgasen sowie ausgewählten Luftschadstoffen und zu deren Minderung relevanten Technologien und Anlagenbestände im Umwandlungssektor in einer möglichst einheitlichen und vergleichbaren Art und Weise technisch, ökonomisch und ökologisch zu charakterisieren. Hierzu gehört eine verbale Beschreibung sowie eine für den jeweiligen Anwendungszweck entsprechend strukturierte Datensammlung. Für eine Ablage in den entsprechenden Technologie- und Bestandsdatenbanken des Projektes vorgesehen, dienen sie in erster Linie

- als Grundlage für die Generierung entsprechender LP-Modelldaten zur Optimierung von Minderungsstrategien, des weiteren
- als Datenbasis für detailliertere Simulationsmodelle zu ausgewählten Teilgebieten des Umwandlungssektors sowie schließlich
- als allgemein nutzbares Informationssystem über heutige und zukünftige Energieumwandlungstechnologien.

Die Technologiedaten charakterisieren im Mindestumfang die Energie-in- und -outputs einer Energieumwandlungstechnologie nach den jeweiligen Energieträgern einschließlich der Angaben zu Leistung, Auslastung und Wirkungsgrad (Jahres-Nutzungsgrad); Investitionskosten, konstante sowie variable Betriebskosten, Außerbetriebnahme- und Beseitigungskosten; die Emissionen an CO₂, CO, NO_x, SO₂, CH₄, N₂O, stratosphärischem Wasserdampf, Fluorchlor-Kohlenwasserstoffen sowie sonstige Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffen. Mit diesem Datenumfang ist es möglich, eine Technologie im LP-Modell zwecks Auswahl in optimale Reduzierungsstrategien abzubilden. Dieser Mindestdatenumfang ist für alle betrachteten Technologien im wesentlichen gleich. Für vertiefende Untersuchungen sowie im Sinne eines allgemeinen Informationssystems werden weitere allgemeine und technologiespezifische Informationen angegeben und in der Datenbank abgelegt. Einzelne Beispiele werden später angegeben.

Die Bestandsdaten für das Bezugsjahr 1989 sind wichtig, um einerseits Energieverbräuche und Emissionen des bestehenden Energieumwandelungssystems als Bezugsbasis für den Nachweis von Emissionsminderungen nutzen zu können. Durch die Typen- und die Altersstruktur des Anlagenbestandes ist desweiteren eine wichtige Information über den zu erwartenden Ersatzbedarf gegeben. Insbesondere unter den Bedingungen intensiver Entwicklung und z. T. sehr geringer Zuwachsraten des Energiebedarfs wird der altersbedingte Anlagenersatz eine wichtige Bestimmungsgröße für die mögliche Einführung neuer, qualitativ verbesserter Technologien. Angesichts der Tatsache, daß bei Treibhausgasemissionen der konkrete geographische Emissionsort in der Regel uninteressant ist (im Unterschied zu andern Luftschadstoffen), daß aber eine an Landes- oder Verwaltungsgrenzen gebundene politische Verantwortung für die Emissionsminderung besteht, wird im Minimum eine Unterteilung der Anlagenbestände nach Bundesländern angestrebt. Eine weitere, für die Darstellung minderungsrelevanter Rationalisierungsmaßnahmen (z. B. standortabhängige Maßnahmen der Wärmeauskopplung oder Abwärmenutzung) durchaus wünschenswerte noch detailliertere Beschreibung des Anlagenbestandes erweist sich gegenwärtig als kaum realisierbar. Lediglich bei ausgewählten Großanlagen und -systemen wie beispielsweise Kernkraftwerken, ausgewählten großen konventionellen Kraftwerken, einzelnen großen Fernwärmesystemen sowie Teilen des Strom- und Gasnetzes erscheint heute eine detailliertere Beschreibung des Bestandes auf der Basis von Einzelanlagen möglich.

Die folgenden Technologiefelder bzw. Bereiche des Umwandlungssektors werden vom vorliegenden Teilprojekt erfaßt:

- Elektroenergieerzeugung in Wärmekraftwerken nach Brennstoffarten (Kernenergie, Stein- und Braunkohle, Heizöl schwer und leicht, Erdgas, sonstige Brennstoffe) und aus Wasserkraftwerken > 1 MW sowie Elektroenergieimport,
- Fern- und Nahwärmeerzeugung nach Brennstoffarten und Anlagentypen,
- Raffinerien und Ölveredelung,
- Stein- und -Braunkohleveredelung (Brikettierung, Verkokung, Vergasung, Verflüssigung),
- Energetische Nutzung von Abfällen,

- Brennstoffzellen,
- Erzeugung neuer Sekundärenergieträger (Methanol, Wasserstoff, Mobil Oil Process),
- Transport, Verteilung und Speicherung leitungsgebundener Energieträger (Elektroenergie, Fernwärme, Erdgas, Wasserstoff).

Eine gewisse Sonderstellung in diesem Zusammenhang nehmen eine detailliertere Beschreibung des

- Kernbrennstoffzyklus
sowie Grundsatzuntersuchungen zu den Möglichkeiten einer
- Rückhaltung und Entsorgung von CO₂ bei fossilen Energiewandlungssystemen ein.

In der Regel wird jedes Technologiefeld durch mehrere alternative Einzeltechnologien bzw. unterschiedliche Bauformen repräsentiert. Um eine hohe Qualität der Bearbeitung derart unterschiedlicher Technologiefelder und Einzeltechniken zu sichern, wurden möglichst kompetente Partner als Unterauftragnehmer gewonnen, die zu einem jeweils eng umrissenen Teilgebiet ihrer Fachrichtung zuarbeiten. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die diesbezüglich erteilten Unteraufträge. Tabelle 2 enthält jene Aufgaben, die vom IER, dem Teilprojektverantwortlichen, selbst bearbeitet werden. Die Einheitlichkeit der Bearbeitung bei gleichzeitiger Berücksichtigung der Spezifik des jeweiligen konkreten Gegenstandes mußte neben Vorgabe des einheitlichen Analyserasters vor allem durch regelmäßige Konsultationen mit den Unterauftragnehmern gesichert werden.

Tabelle 1: Unteraufträge: Technologiebeschreibung/Datenerhebung nach Auftragnehmern

| | Bearbeiter | Aufgabe(n) | T/B* |
|----|--|--|----------------------|
| 1 | Siemens/KWU, Erlangen | - Fossile Kraftwerke - Kernkraftwerke (KKW) | T T |
| 2 | Kernforschungszentrum, Karlsruhe | - Kernbrennstoffkreislauf | T, B. |
| 3 | Dt. Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe, Peine | Endlagerung radioaktiver Abfälle | B |
| 4 | Inst. f. Wasserbau, Universität Stuttgart | - Wasserkraftwerke > 1 MW | T, B |
| 5 | Dt. Montan Technologie für Rohstoff-Energie-Umwelt, Essen | - Kohleveredelung | T, B |
| 6 | Inst. f. Siedlungswasserbau, Universität Stuttgart | - Energetische Müllnutzung | T, B |
| 7 | Engler-Bunte-Institut, Universität Karlsruhe | - Raffinerien u. Ölveredelung | T, B |
| 8 | Inst. f. Energieverfahrenstechnik, KFA Jülich | - Brennstoffzellen - Methanolerzeugung - Mobil Oil Prozeß | T, B T, B |
| 9 | Ludwig-Bölkow-Systemtechnik, Ottobrunn | - H ₂ -Brennstoffzellen - Elektrolyse - Wasserstoffspeicherung u. Transport | T, B T, B T, B |
| 10 | Inst. f. Elektr. Anlagen u. Energiewirtschaft, WTH Aachen | - Elektroenergietransport und -verteilung | T, B |
| 11 | Dipl.-Ing. H. P. Winkens, Mannheim | - Fernwärmetransport u. -verteilung | T, B |
| 12 | Ruhrgas AG, Essen, Dorsten | - Erdgastransport, Speicherung, -verteilung | T, B |
| 13 | Institut f. Energetik, Leipzig | - Vergangenheitsdaten chem. DDR: Umwandlungssektor ohne Nah- und Fernwärme | B |
| 14 | Inst. f. Energietechnik, TU Dresden | - Vergangenheitsdaten chem. DDR: Nah- u. Fernwärme | B |
| 15 | Prof.W. Seifritz, Windisch (CH) | - Entsorgungsmöglichkeiten für Klimagase - Zuarbeiten zu "Kraftwerke" | T |
| 16 | Inst. f. Reaktorentwicklung KFA Jülich | - Hochtemperaturreaktoren | T |

* T = Technologiedaten /

B = Bestandsdaten

Tabelle 2: Vom IER bearbeitete Teilaufgaben der Technologiebeschreibung/Bestandserhebung

| | Aufgaben |
|---|---|
| 1 | Technologiebeschreibung ausgewählter Kraftwerke für Prototypdatenbank |
| 2 | Wärme- und Kälteanlagen: Anlagenbestand 1989, alte Bundesländer |
| 3 | Stromimport aus konventionellen Kraftwerken, Bestand 1989 |
| 4 | Fern- und Nahwärme: Anlagenbestand 1989, alte Bundesländer |
| 5 | Großwärmepumpen für Fern- und Nahwärmeerzeugung, Technologie und Anlagenbestand 1989, alte Bundesländer |
| 6 | Sonstige neue Energieträger |

3 Stand und Ergebnisse der Datenerarbeitung anhand ausgewählter Beispiele

Von den insgesamt konzipierten Teilaufgaben sind gegenwärtig knapp die Hälfte im wesentlichen abgeschlossen und bei einem Drittel liegen Teilergebnisse vor. Bei rund 20 % gibt es größere Verzögerungen. Soweit der erste Überblick zeigt, gibt es bei den vorliegenden Zuarbeiten trotz des Bemühens um Vereinheitlichung der Beschreibung deutliche Unterschiede, sowohl in bezug auf die Ausführlichkeit vor allem der verbalen Technologiebeschreibungen als auch hinsichtlich der Vollständigkeit und Detailliertheit der zu ermittelnden Daten. Wesentliche objektive Ursachen hierfür ergeben sich aus dem z. T. extrem unterschiedlichen technischen Reifegrad der betrachteten Technologien, den unterschiedlichen Möglichkeiten und Erfahrungen mit ihrer modellmäßig vereinfachten Beschreibung als auch durch Unterschiede bei der Zugänglichkeit von Daten aus einzelnen Bereichen der Wirtschaft. Infolge dessen sollen Ergebnisse der Datenerhebung als auch Probleme und Lösungsansätze an einer Reihe von Einzelbeispielen sichtbar gemacht werden.

3.1 Bereich Stromerzeugung

Vorhandene Grundlagen sind die durch das IER erarbeitete Prototypdatenbank [1] von zunächst neun verschiedenen wichtigen Kraftwerkstypen, die in Zukunft ergänzt und erweitert werden muß. Hierzu stehen noch wichtige Zuarbeiten aus, die in nächster Zeit erwartet werden können. Weiterhin liegt vor eine detaillierte Erfassung des Kraftwerksbestandes der öffentlichen Versorgung in der ehemaligen DDR [2] sowie eine ausführliche Technologiebeschreibung und entsprechende Bestandserfassung von Wasserkraftwerken > 1 MW in den alten Bundesländern [3]. Anstrengungen werden zur Zeit unternommen, um Daten zum Bestand an Wärmekraftwerken einschließlich Kernkraftwerken in den alten Bundesländern zu ergänzen und zweckmäßig zu strukturieren.

Angesichts der Tatsache, daß es sich bei Kraftwerken in der Regel um eindeutig abgrenzbare Einzelanlagen mit häufig nur einem Hauptinput sowie einem Hauptoutput und einer definierten technischen Nutzungsdauer der Gesamtanlage handelt, ist die modellmäßige Abbildung neu zu errichtender Kraftwerkstechnik vergleichsweise einfach. Tab. 3 zeigt als Retrievalbeispiel die Listenabfrage nach einem Kohlekraftwerksblock für das Referenzjahr 2005 aus der Prototypdatenbank [1]. Die in dem Beispiel gezeigten Daten umfassen dabei lediglich einen Ausschnitt des für die Beschreibung der entsprechenden Technologie notwendigen und erfaßten Datenumfanges.

Als Problem stellt sich die projektspezifische Vereinfachung und Strukturierung des überaus heterogenen und vielgestaltigen Anlagenbestandes dar. Ziel ist hierbei eine sinnvolle Klassifizierung dieses Bestandes nach solchen Merkmalen, die einerseits eine möglichst sachgerechte Abbildung des altersbedingten Anlagenersatzes als Mindestforderung ermöglichen, andererseits aber auch eine darüber hinausgehende Auswertung für weitere, im Zusammenhang mit CO₂-Emissionsminderungsstrategien gegebenenfalls interessant werdende Fragestellungen offen zu halten. Beispielsweise werden zum Anlagenbestand an Wärmekraftwerken in der ehemaligen DDR bis zu nahezu einhundert Angaben auf Basis von einzelnen Blöcken oder Kraftwerksteilen

Tab. 3: Ergebnisse eines Retrievals für einen Prozeß

| Prozeßgruppe: Fossile Kondensationskraftwerke | | | |
|--|----------------|---------|-------------|
| Prozeß: Steinkohlekraftwerk mit Staubfeuerung, REA und Denox | | | |
| Referenzjahr: 2005 | | | |
| Kurzbezeichnung | Wert | Einheit | Güte |
| Leistu(bru.) | 710 | MW | 1 |
| Leistu(net.) | 653 | MW | 1 |
| Kostenjahr | 1989 | | 1 |
| Inbetriebnah | 2000 | | 2 |
| Zeitverfügba | 90,0 | % | 2 |
| Anlagenfläch | 81000 | m**2 | 1 |
| Gesamtfläche | 200000 | m**2 | 1 |
| Planungsdau | 4 | a | 2 |
| Bauzeit | 4 | a | 2 |
| Lebensdauer | 35 | a | 2 |
| Amortisation | 17 | a | 1 |
| Gesamtinvest | 1273,35 | MDM | 2 |
| F1 | Hilfe | F5 | Einzel-Info |
| F6 | Prozeßvariante | F9 | Drucken |

abgefragt, die indes nicht vollständig angegeben werden können. Allerdings erweisen sich viele der Anlagen unter den gegenwärtigen Randbedingungen als nicht wirtschaftlich mit modernen Rauchgasreinigungsanlagen nachrüstbar, so daß deren Stillsetzung mit Auslaufen des Bestandsschutzes abzusehen ist. Die für eine modellgerechte Abbildung erforderlichen Informationen beschränken sich unter diesen Umständen auf Zeitpunkt und Kapazität der außer Betrieb zu nehmenden Kraftwerksanlagen und darauf, welche Brennstoffverbräuche sowie Emissionen hierdurch vermieden werden. Tab. 4 zeigt einen Vorschlag für den diesbezüglich reduzierten Datenumfang.

Tabelle 4: Beispiel abzuspeichernder Bestandsdaten für ein Kohlekraftwerk bei definierter Außerbetriebnahme (Betriebsdaten 1989)

| | |
|------------------------------|-----------------------------------|
| Name: | Kraftwerk Lübbenau 1 |
| Stammbetrieb: | Vereinigte Energiewerke AG Berlin |
| Bundesland: | Brandenburg |
| Prozeßgruppe: | fossil gefeuerte Kond.-KW |
| Inbetriebnahme: | 1960 |
| Stilllegung: | 1994 |
| Benutzungsstunden: | 7336 h/a |
| Phm: | 300 MW |
| Strom: | 2201 GWh |
| Wärmeabgabe: | 192 TJ |
| Rohbraunkohle: | 3567 kt (27426 TJ) |
| Heizöl: | 4 kt (151 TJ) |
| J.Emission SO ₂ : | 63210 t/a |
| J.Emission NO _x : | 4194 t/a |
| J.Emission Staub: | 5403 t/a |
| J.Emission CO: | 302 t/a |
| J.Emission CO ₂ : | 3056 t/a |

3.2 Bereich Raffinerien und Ölveredelung

Raffinerien stellen sehr komplexe Energieumwandlungsanlagen dar, die nicht zuletzt deshalb in der Vergangenheit intensiv untersucht und modellmäßig abgebildet worden sind. Unter dem Blickwinkel der Emission von CO₂ bzw. allgemein von Treibhausgasen im Energieversorgungssystem gibt es Zusammenhänge zwischen Rohstoffinput/Produktoutput und den Emissionen aus der Raffinerie infolge ihrer von den äußeren Einbindungen mehr oder minder stark abhängigen internen Anlagenstruktur. In der Studie zum Bereich Raffinerien und Ölveredelung [4] wird die gesamte Raffineriekapazität der Bundesrepublik in einer sogenannten "Modellraffinerie Bundesrepublik" zusammengefaßt, die in ihren qualitativen äußeren Einbindungen und ihrer grundsätzlichen internen Anlagenstruktur in Abb. 1 und 2 wiedergegeben wird. Aus der gesam

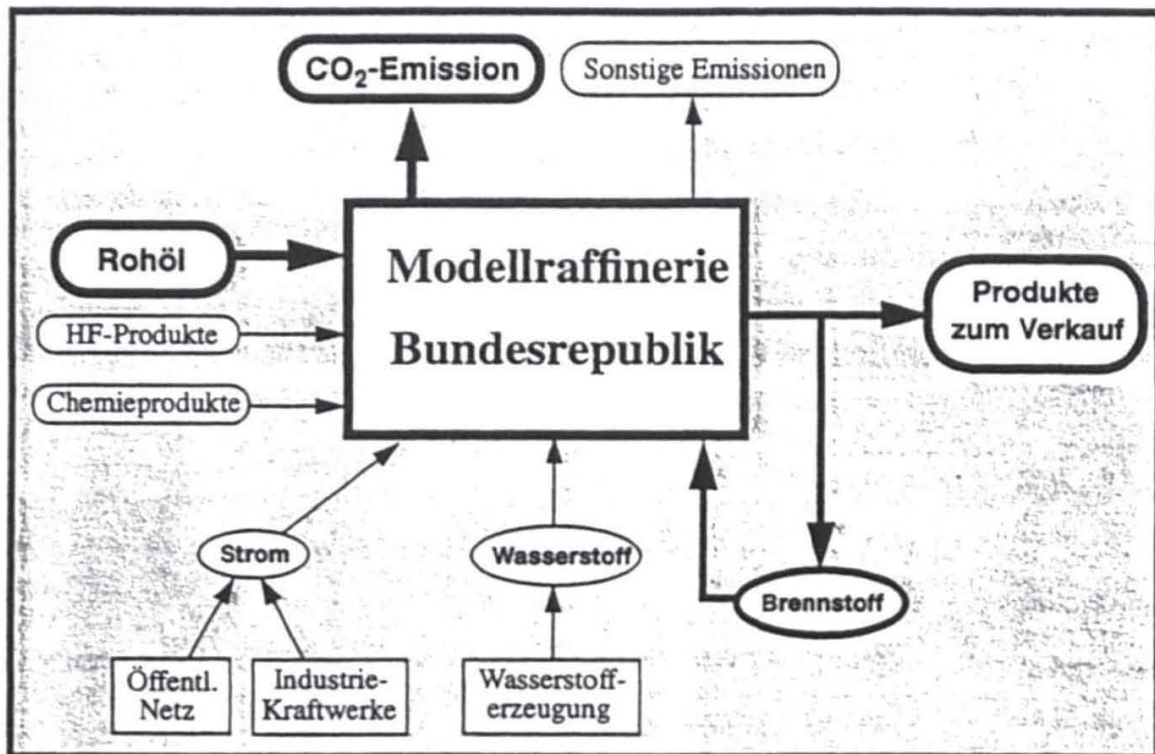


Abb. 1: Stoff- und Energieströme der Modellraffinerie Bundesrepublik
HF: Halbfertig-Produkte

ten Anlagenstruktur wird für jedes gewünschte Endprodukt ein spezieller "Anlagenverbund" benötigt, wobei viele der konkreten Einzeltechnologien zur gleichen Zeit anteilmäßig in mehreren solche Anlagenverbunden integriert sind. Die Abb. 3 und 4 zeigen solche speziellen Verbunde für die Erzeugung von Ottokraftstoff und von schwerem Heizöl entsprechend. Erst für die konkrete Einzeltechnologie lassen sich die vom speziellen Endproduktvektor letztlich unabhängigen technischen, ökonomischen und ökologischen Daten angeben, wie sie der standardisierten Beschreibung im Projekt entsprechen. In Abb. 5 ist ein kurzer Auszug aus der Beschreibung der Einzeltechnologie "Visbreaker" wiedergegeben. In analoger Weise werden alle anderen Einzeltechnologien im Rahmen der Modellraffinerie Bundesrepublik beschrieben. Auf dieser Grundlage können relativ beliebige Rohstoffinputs und Produktoutputs sachgerecht abgebildet werden. Das trifft z. B. auch zu, wenn Forderungen nach neuen Kraftstoffqualitäten wie etwa eine Verringerung des Benzolgehaltes bei Otto-Kraftstoff berücksichtigt werden sollen.

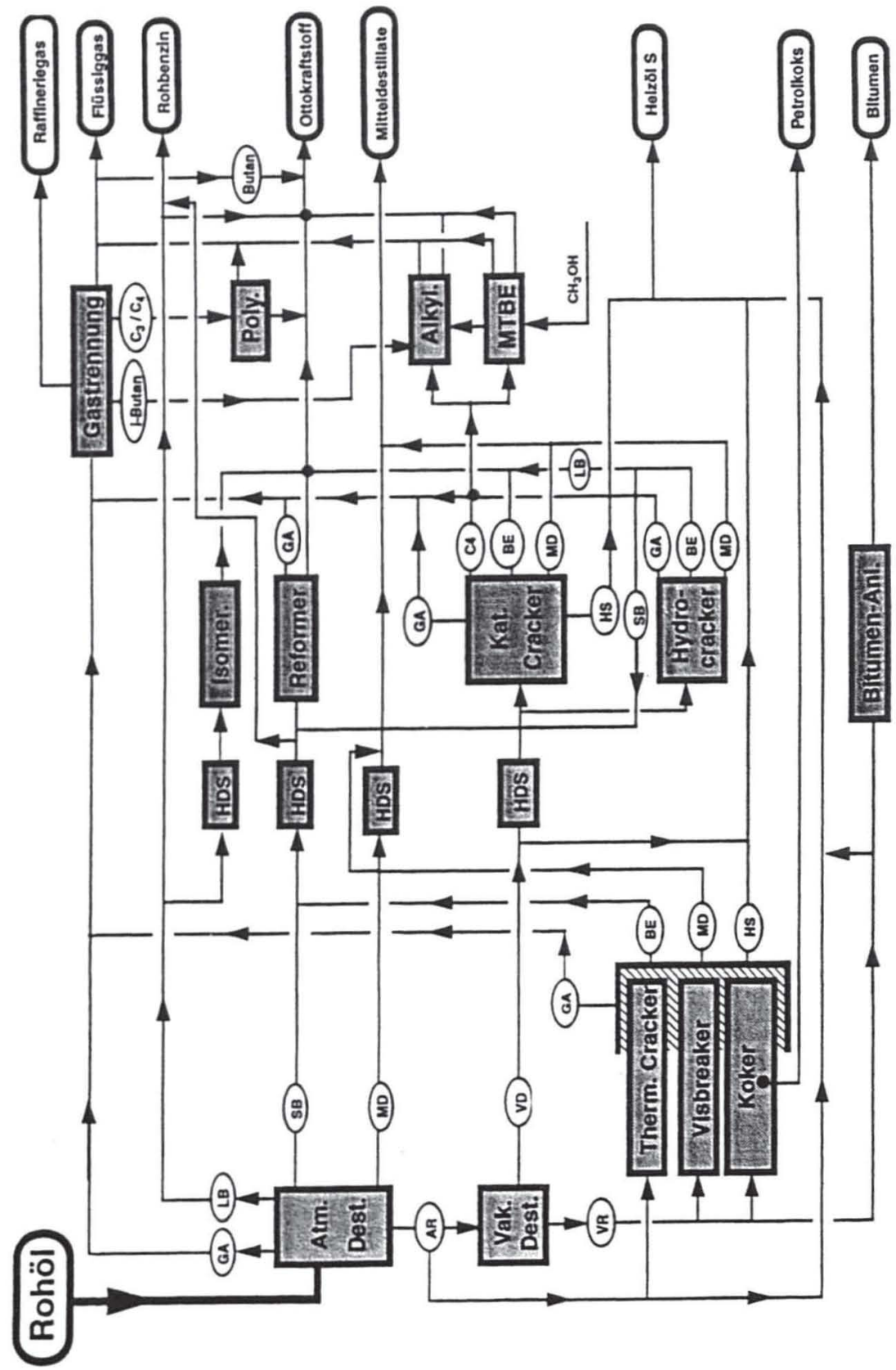


Abb. 2: Anlagenverbund der Modellraffinerie (HDS: Entschwefelungsanlagen; Poly.: Polymerisationsanlagen; Alky.: Alkylierung; MTBE: MTBE-Herstellung; Abkürz. der Stoffströme siehe Abb. 5-4)

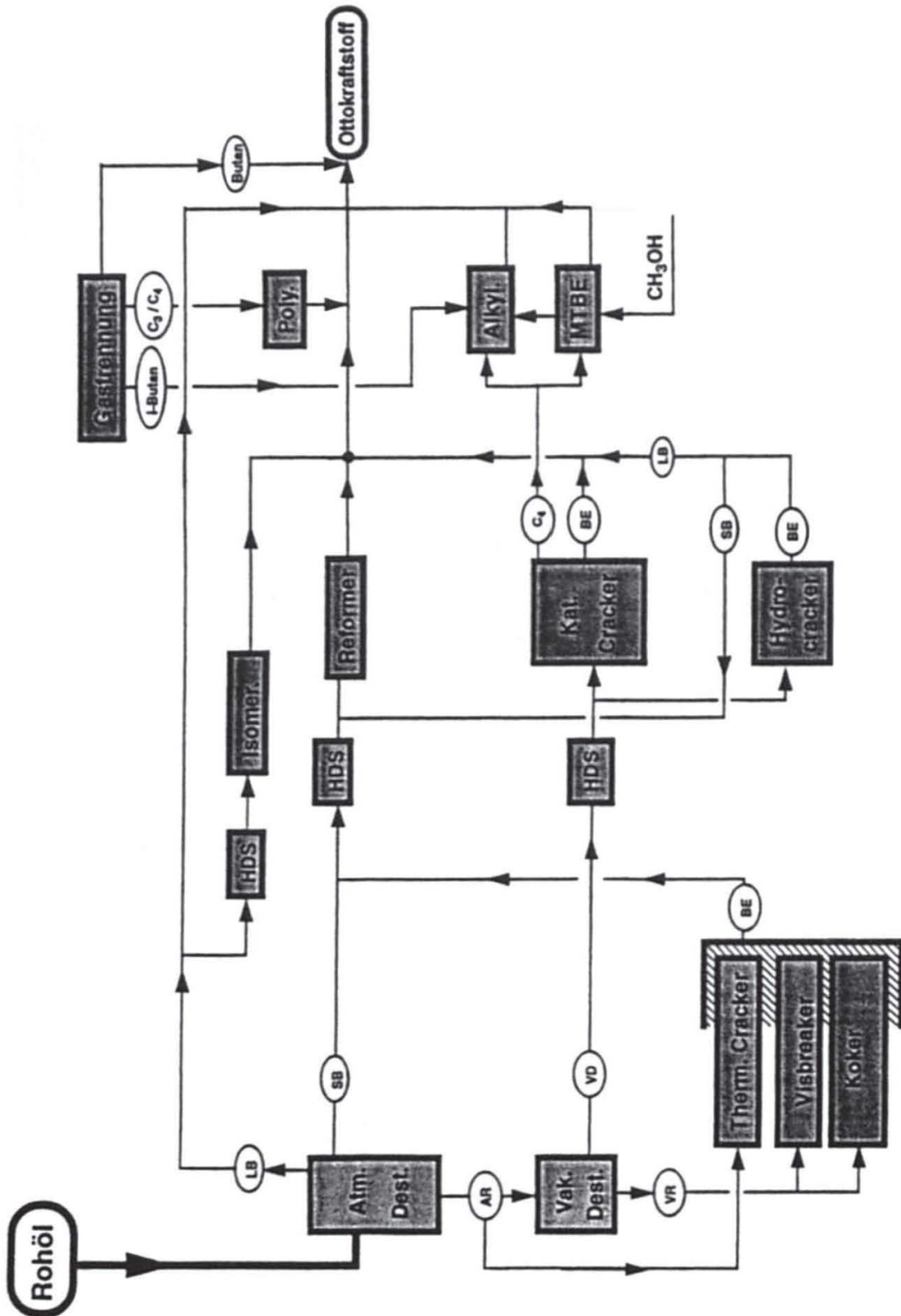


Abb. 3: Anlagenverbund der Modellraffinerie zur Erzeugung von Ottokraftstoff (Abkürz. siehe Abb. 5-2 und 5-4)

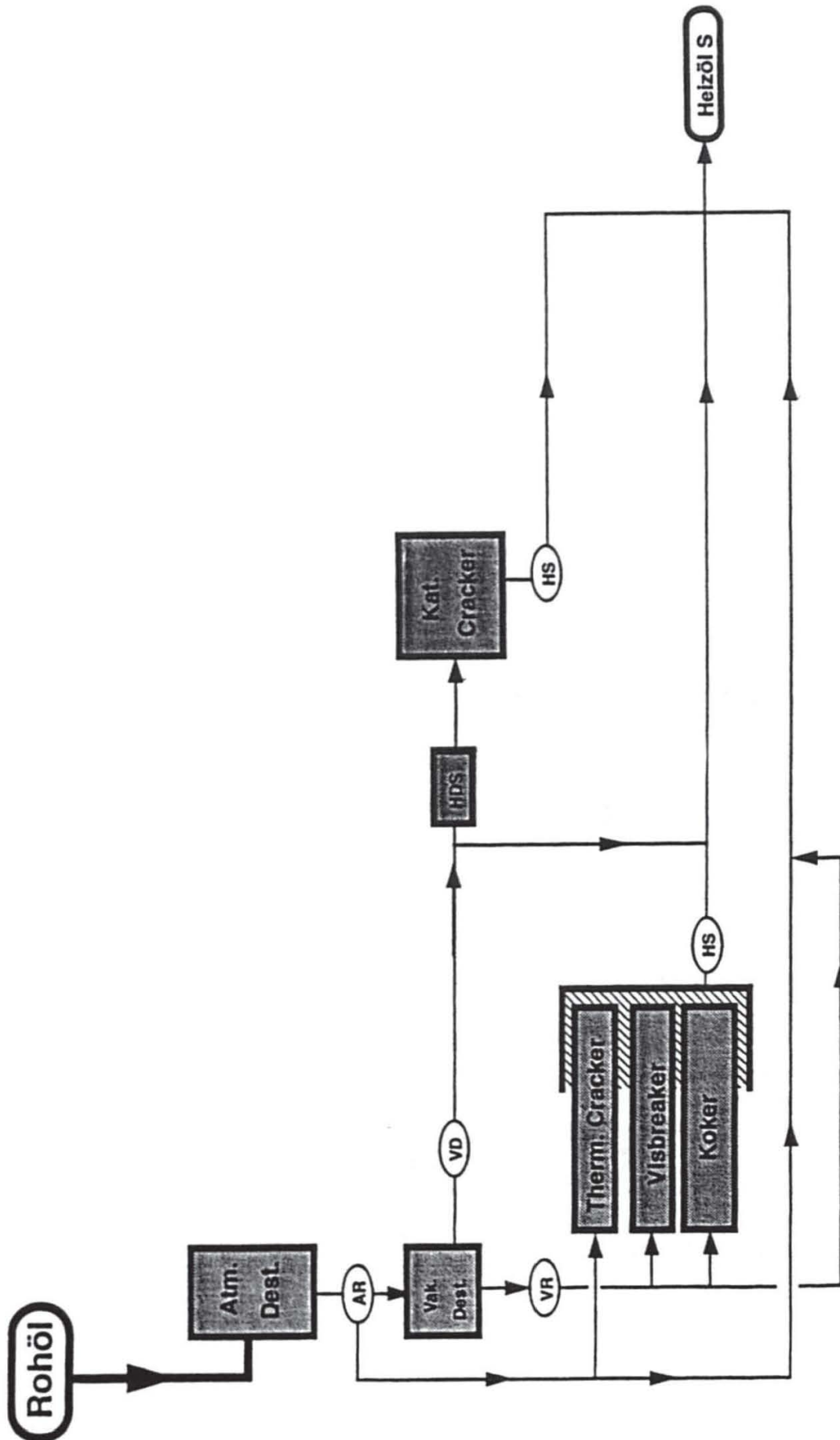
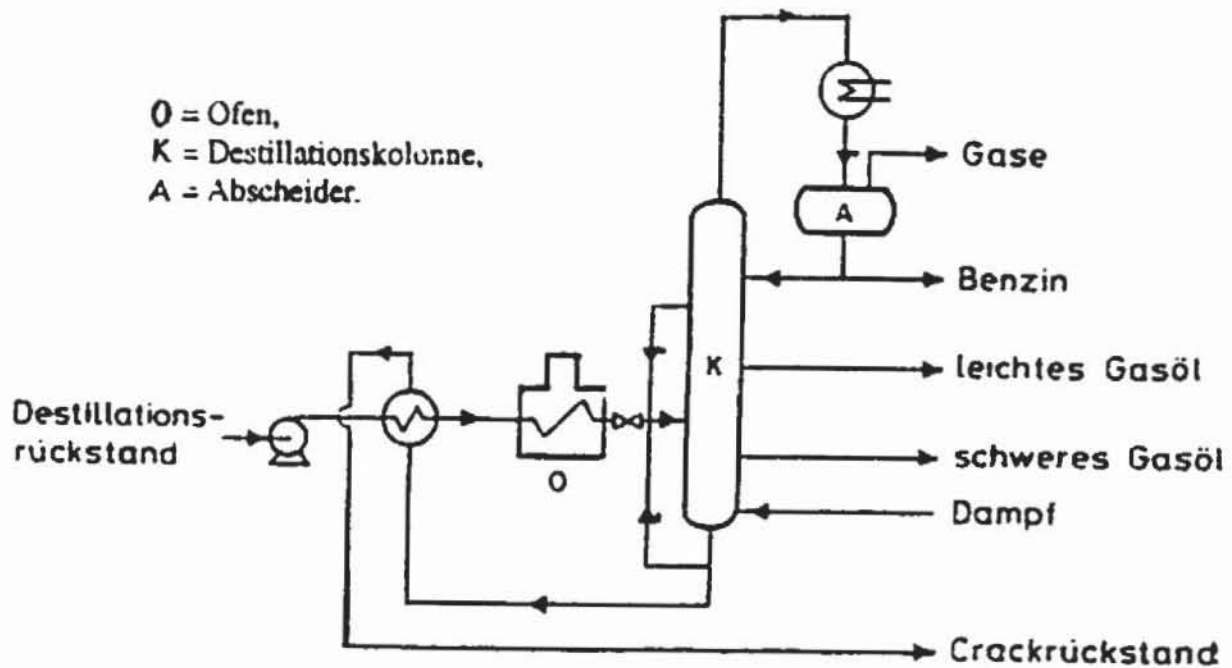


Abb. 4: Anlagenverbund der Modellraffinerie zur Erzeugung von schwerem Heizöl (Abkürz. siehe Abb. 5-2 u. 5-4)



| Prozeß | | Raffinerie / Visbreaker |
|----------------|-------|--------------------------|
| Kapazität | t/a | 770.000 (Heizöl, schwer) |
| Verfügbarkeit | % | 96 |
| Einsatz VR-Öl | t/a | 1.000.000 |
| Unterfeuerung | GJ/a | 554.000 |
| Strombedarf | MWh/a | 4.000 |
| Erzeug. HöS | t/a | 770.000 (0,6 Gew.-% S) |
| Mitteldestill. | t/a | 140.000 (0,3 Gew.-% S) |
| Benzin | t/a | 60.000 |
| Investitionen | DM | 85.000.000 |
| Betriebskosten | DM/a | 9.540.000 |

Abb. 5:

Auswahl von Technologiedaten: Raffinerie / Visbreaker

Das Projekt ist konzipiert für einen relativ breiten Nutzerkreis. Durch die Vorstrukturierung einer "Modellraffinerie" im LP-Modell und die entsprechende datenmäßige Beschreibung der Einzeltechnologien wird gesichert, daß die komplizierten Zusammenhänge im Raffineriebereich auch durch den Nichtfachmann mit einer bestimmten Modellgenauigkeit widergespiegelt werden können. Sinngemäß gilt die analoge Aussage übrigens auch für viele andere Teile des Energieumwandlungssektors, wenn auch die Bedingungen vielleicht nicht so kraß wie im Falle des Raffineriebereichs sind. Allerdings werden nicht alle Nutzer an einer derart detaillierten Beschreibung des Raffineriebereichs interessiert sein, wie sie durch Modell und Datenbasis grundsätzlich ermöglicht wird. Andererseits sind im Zusammenhang mit CO₂-Minderungsstrategien bis zum Jahr 2020 aber auch solche Einschnitte in unser gegenwärtiges Energiesystem denkbar, welche die Grenzen einer sinnvollen Vorstrukturierung überschreiten. Im ersten Falle wäre eine vereinfachte Beschreibung durch einige wenige "Standardfälle" hilfreich, die nicht weiter in Einzelkomponenten aufgelöst sind. Im zweiten Fall müßte nach Definition der zu betrachtenden Grenzfälle überprüft werden, inwieweit die "Modellraffinerie" und das Spektrum ihrer wesentlichen Einzeltechnologien zu modifizieren sein wird.

3.3 Bereich Transport und Verteilung leitungsgebundener Energieträger

Hinsichtlich Transport und Verteilung leitungsgebundener Energieträger kann bislang auf Studien für die Elektroenergie [5] und die Fernwärme [6, 7] zurückgegriffen werden, während der entsprechende Arbeitsabschluß für das Erdgas noch aussteht.

Im Unterschied zu den Energieerzeugungs- und Umwandlungsanlagen handelt es sich bei Transport und Verteilung weniger um funktionell klar abgrenzbare Einzelanlagen, sondern um miteinander verflochtenen Anlagensysteme, die einer kontinuierlichen Weiterentwicklung, Erneuerung und Modernisierung unterliegen. Bemerkenswert sind des weiteren die in der Regel deutlich längere technische Nutzungsdauer der Hauptelemente der Verteilungsnetze im Vergleich z. B. mit dem Kraftwerkspark sowie eine stärkere Abhängigkeit der spezifischen Investitions- und Betriebskosten je Einheit übertragbarer Leistung bzw. Jahresarbeit in Abhängigkeit von den lokalen geographi-

schen Bedingungen, der Bedarfsdichte u. a. m.. Schließlich ist zu bemerken, daß vor allem bei den bundesweiten Verbundsystemen für Strom und Gas, die gleichzeitig auf eine lange Entwicklungsgeschichte zurückblicken können, die gewachsenen Systemstrukturen sowohl die technische Entwicklungsgeschichte als auch die gesellschaftlichen Rahmenbedingungen der jeweiligen leitungsgebundenen Energieversorgung widerspiegeln. Abb. 6 und 7 zeigen die gegenwärtige organisatorische und technische Struktur des öffentlichen Elektroenergieversorgungssystems in den alten Bundesländern.

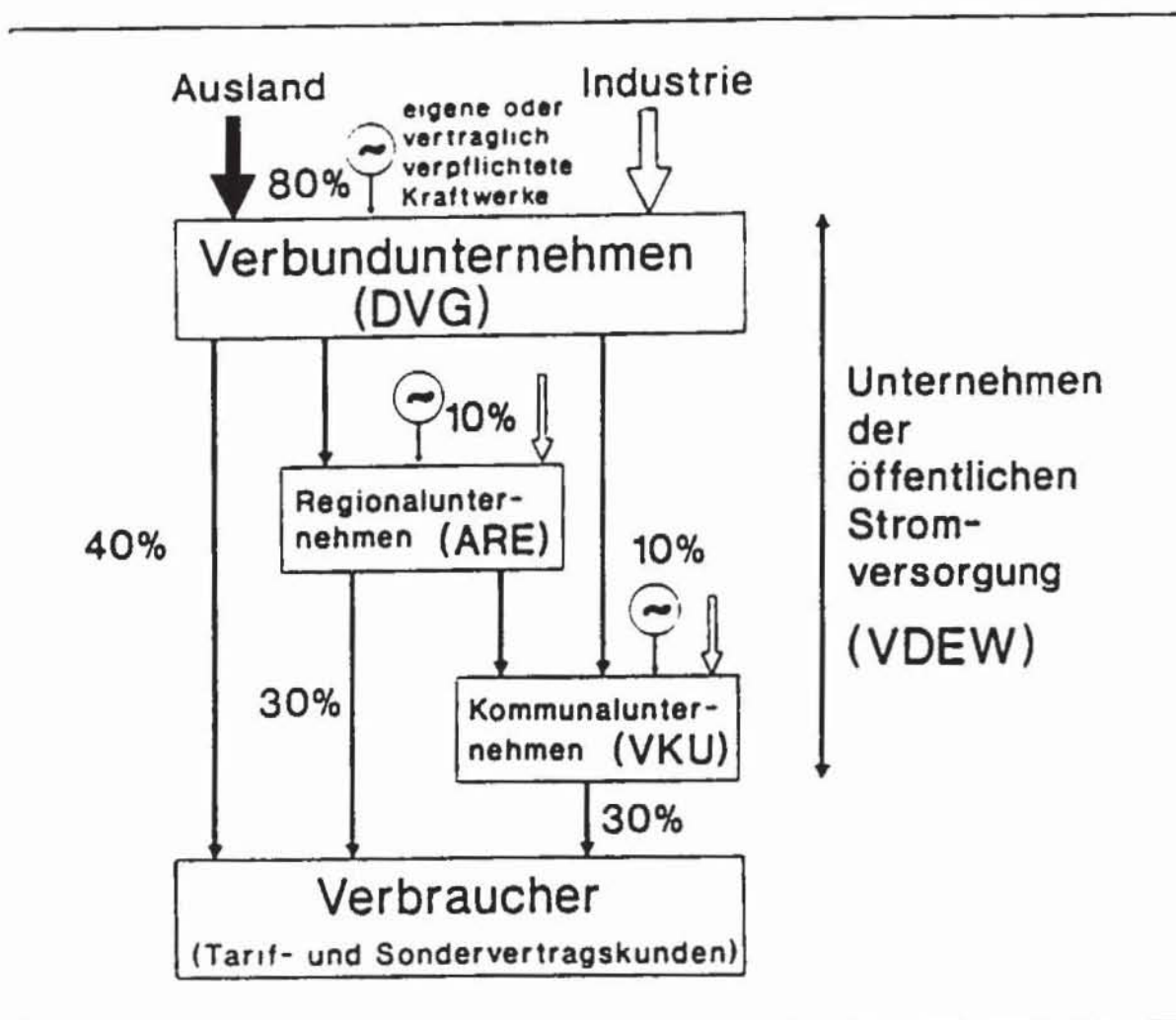


Abb. 6: Versorgungsstruktur in der Bundesrepublik Deutschland

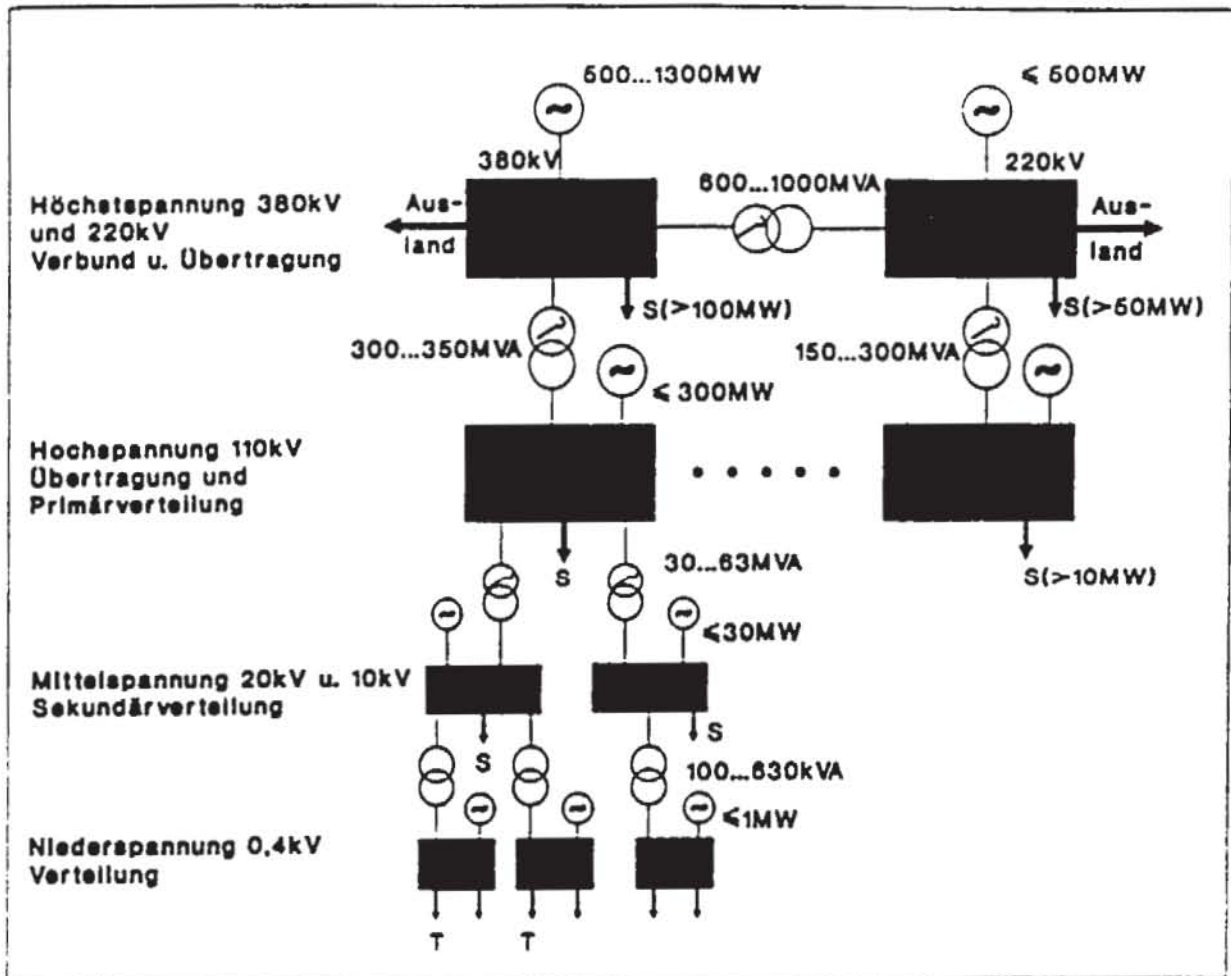


Abb. 7: Struktur des öffentlichen Elektrizitätsversorgungssystems der Bundesrepublik Deutschland (S. Sondervertragskunden, T. Tarifkunden) mit charakteristischen Einheitengrößen

Hinsichtlich einer projektgerechten modellhaften Beschreibung des Ausbaus und der technischen Weiterentwicklung entsprechender Versorgungssysteme wird der Weg beschritten, die einzelnen Systemelemente, d. h. in bezug auf Stromversorgungssysteme z. B. einzelne Freileitungen, Kabel, Transformatoren usw. wie relativ autonome Teilsysteme zu beschreiben. Abb. 8 zeigt ein entsprechendes Datenblatt für eine 110-kV-Doppelfreileitung. Aus derartigen Einzelementen kann bei hinreichender Sachkenntnis und unter Zuhilfenahme des verbalen Teils der Systembeschreibung ein partieller Ausbau des Verbundnetzes näherungsweise abgebildet werden. Allerdings werden hierbei immer dann größere Unsicherheiten zurückbleiben als seitens der Datenbasis unvermeidbar ist, wenn derartige Extrapolationen vom Nichtfachmann

| Abb. 8: | | Hochspannungs-Doppelfreileitung | |
|--|--|--|---------|
| | | 265/35 mm²-Aluminium/Stahl-Einfachseil | |
| Nennspannung | | 110 kV | |
| Tragmast | | | |
| | | Abmessungen a 29,00 m b 15,00 m c 4,00 m d 2,00 m e 5,60 m f 3,60 m g 7,60 m | |
| <ul style="list-style-type: none"> ● Phasenseil 265/35 mm² Al/St ○ Phasenseil 265/35 mm² Al/St | | Schutzstreifenbreite in Spannungsfeldmitte bei ausgeschwungenem Leiter 36 m Regelspannweite 320 m | |
| Technische Daten | | (Erdbodenwiderstand: 100 Ωm) | |
| Mitsystem (je Stromkreis) | | | |
| - Widerstandsbelag | | 0,110 Ω/km | |
| - Induktivitätsbelag | | 0,387 Ω/km | |
| - Kapazitätsbelag | | 9,4 nF/km | |
| Nullsystem | | | |
| - Widerstandsbelag | | 0,213 Ω/km | |
| - Induktivitätsbelag | | 1,11 Ω/km | |
| - Kapazitätsbelag | | 5,5 nF/km | |
| natürliche Leistung | | 2*33 MW | |
| thermische Grenzleistung | | 2*130 MVA | |
| Verlustleistung bei natürlicher Leistung | | 2*9,6 kW/km | |
| max. elektrische Feldstärke am Erdboden | | 2,6 kV/m | |
| max. magnetische Flußdichte am Erdboden | | 20 μT | |
| Ladeleistung | | 35,7 kvar | |
| Schalleistungspegel (nach VDE) trocken/naß | | <30 dB (A) | |
| HF-Störpegel (nach CISPR) | | 12 dB über 1 μV/m | |
| Ökonomische Daten | | | |
| Errichtungskosten | | 300 000- 500 000 DM | |
| Kosten f. Betrieb, Instandhaltung, Steuern, Versicherung, in % der Errichtungskosten | | 3-5 %/a/km | |
| betriebsübliche Nutzungsdauer | | Beseilung | 40-50 a |
| | | Gestänge | > 70 a |

modelliert werden. D. h. auch hier könnte die komplette Durchrechnung ausgewählter Standardfälle eine wesentliche Hilfe für eine sachgerechte Nutzung des Instrumentariums darstellen.

Im Unterschied zu Elektroenergie- und Erdgas, die letztlich bundesweit verteilt werden, ist die Fernwärmeversorgung auf relativ kleine Territorien begrenzt und erfolgt im Inselbetrieb oder in einem territorialen bis maximal regionalen Verbundbetrieb. Die hinsichtlich CO₂-Minderung entscheidenden Fragen betreffen langfristig vor allem den weiteren Ausbau entsprechender Transport- und Verteilungssysteme. Hierbei könnten die bereits vorhandenen langlebigen Systeme eine wichtige Ausgangsbasis für die Ausbreitung der Fernwärmeversorgung sein. In bezug auf die ehemalige DDR, die mit rund 1/4 des Wohnungsbestandes einen relativ hohen Ausbaugrad der Fernwärmeversorgung erreicht hatte, wurde für ausgewählte Standorte eine möglichst detaillierte, über die Abbildung eines Ersatzbedarfes hinausgehende Beschreibung des Anlagenbestandes angeregt. Damit sollen Grundlagen geschaffen werden, um einem zwecks CO₂-Minderung gegebenenfalls interessanten breiten künftigen Ausbau der Fernwärmeversorgung zunächst anhand einzelner Beispiele detaillierter untersuchen zu können.

Tabelle 5 gibt einen Überblick über einige Hauptkennziffern der Dresdner Fernwärmeerzeugungsanlagen und Fernwärmenetze. Abb. 9 zeigt beispielhaft einen Kartenausschnitt mit Teilen des zentralen Fernwärmesystems der Stadt.

Es muß an dieser Stelle noch als offen angesehen werden, ob derartige Ansätze bereits ausreichend sind, um damit Einzelbeispiele zur Entwicklung der Fernwärmeversorgung als potentiell Element künftig CO₂-freier Wärmeversorgungs-lösungen zu untersuchen. Mit Sicherheit sind sie aber geeignet, um Lücken sichtbar zu machen, die besonders auch im Falle einer zunehmenden ökonomischen Konkurrenzfähigkeit der Fernwärmeversorgung möglichst rasch geschlossen werden müßten.

Tab. 5: Übersicht über die technischen Daten der Erzeugeranlagen des Dresdner Zentralen Fernwärmeversorgungsnetzes

| | HKW Nossener Brücke | HKW Dresden-Mitte | SHW Reick |
|---------------------------------------|---|---|---|
| Anzahl der Kessel | 5 Stück, je 125 t/h Dampf | 4 Stück 2 x 100 t/h Dampf (DE 6/7) 2 x 60 t/h Dampf (DE 1/2) | 2 Stück je 12,5 t/h Dampf 4 Stück je 116 MW _{th} Heißwasser, davon 2 Stück alternativ mit Stadtgas befeuerbar, dann 93 MW _{th} |
| Baujahr bzw. Inbetriebnahme | 1966/67 | DE 1/2 1962/63, mit alt Kesselgerüst (> 30 Jahre) DE 6/7 1982/83; mit alt Kesselgerüst u. Trommel (> 30 Jahre) | 1976/77 |
| Installierte Wärmeleistung | 560 MW | 255,2 MW | 480,2 MW (464 MW Heißwasser, 16,2 MW Dampf) |
| Maximale Wärmeabgabeleistung | 360 MW | 166 MW (umweltbedingt nur noch 110 MW zulässig) | 464 MW Heißwasser 14,4 MW Dampf |
| Installierte elektr. Erzeugerleistung | 100 MW | 32 MW (umweltbedingt nicht mehr zulässig) | - |
| eingesetzte Brennstoffart | Rohbraunkohle | DE 1/2: Braunkohlebrickett (BB) DE 6/7: Rohbraunkohle (RbK) | Schweres Heizöl (HED) Stadtgas (SG -alternativ, nur für 2 Heißwassererzeuger sowie für Dampferzeuger) |
| Brennstoffverbrauch pro Jahr (1989) | 1,3 Mio t | ca. 240.000 t RbK ca. 17.700 t BB | ca. 37,5 Mio m ³ SG ca. 2.057,3 t HED |
| Frischdampfparameter | 70,5 bar/500 °C | 37 bar/425 °C | - |
| Emissionen pro Jahr (1989): | | | |
| SO ₂ | 16.427 t | 2.315 t | 115 t |
| Staub | 1.387 t | 266 t | - |
| NO _x | 1.713 t | 369 t | 23 t (?) |
| Anzahl Turbinen | 4 Stück, je 25 MW _d | 1 Stück | - |
| Gegendruck | 2 Stück; 1,5...2,5 bar, 168 °C | | |
| Entnahme-Kond | 2 Stück; 4 ... 5,5 bar, 242 °C | 1 Stück | |
| Baujahr Turbinen | 1966/67 | 1954 | - |
| Rauchgasreinigungsanlage | Pro DE 1 E-Filter, Reingasstaubgehalt ca. 300mg/m ³ _n | DE 1/2 je 1 Zyklonabscheider DE 6/7 je 1 E-Filter | - |
| Schornsteinhöhe | 140 m | 65 m | 200 m |
| Jahresnutzungsgrad Wärmeerzeugung | 51,5 % | 68,3 % | 62,2 % |
| Jahresnutzungsgrad Stromerzeugung | 15,5 % | 2,8 % | - |



Abb. 9: Teilübersicht über das Fernwärmeversorgungssystem von Dresden

3.4 Bereich Wasserstofferzeugung, -speicherung, -transport und -verteilung

Grundlage der projektgerechten Darstellung ist die im Unterauftrag erarbeitete Studie [8]. Abb. 10 stellt das breite Feld hierfür im einzelnen betrachteter Technologien dar. Die Studie enthält im wesentlichen kurz gefaßte standardisierte Beschreibungen der unterschiedlichen Technologien, die entweder alternativ auf ein und derselben Ebene oder in Kombination mit anderen auf den unterschiedlichen Ebenen einer großmaßstäblichen energetischen Wasserstoffnutzung eingesetzt werden können. Darüber hinaus werden kurze Zusammenfassungen zu den einzelnen Gruppen qualitativ ähnlicher Technologien gegeben.

Die Tabellen 6 bis 8 geben z. B. so einen zusammenfassenden Überblick über die gegenwärtige (1987) Wasserstofferzeugung in der Bundesrepublik Deutschland sowie über die ökologischen und wirtschaftlichen Daten der hauptsächlich verwendeten konventionellen Erzeugungsverfahren. Demgegenüber sind in den Tab. 9 und 10 die Hauptkennziffern der wesentlichsten Elektrolyseverfahren sowie von Brennstoffzellen für den potentiellen Einsatz von Wasserstoff für die Stromerzeugung zusammengefaßt.

Tab. 6:

| Wasserstoffproduktion | | | | |
|-----------------------|---------------------------|-----------|-------------------------|------|
| Status 1978 | | | Deutschland | |
| Nebenprodukt | Quelle | Prozeßtyp | Mio. Nm ³ /a | % |
| | Koksofengas | | 2.131 | 27,7 |
| | Benzinreformierung | 2) | 2.407 | 31,3 |
| | Äthylen | | 1.190 | 15,5 |
| | Acetylen(Lichtbogenverf.) | 2) | 345 | 4,5 |
| | Acetylen (Sachsse-Verf.) | 2) | 264 | 3,4 |
| | Chloralkali-Elektrolyse | | 918 | 11,9 |
| | Blausäure | 1) | 125 | 1,6 |
| | Pechverkokung | | 40 | 0,5 |
| | Styrol | | 250 | 3,3 |
| | Aceton | | 8 | 0,1 |
| | Methyläthylketon | | 12 | 0,2 |
| | Gesamt | | 7.690 | 100 |

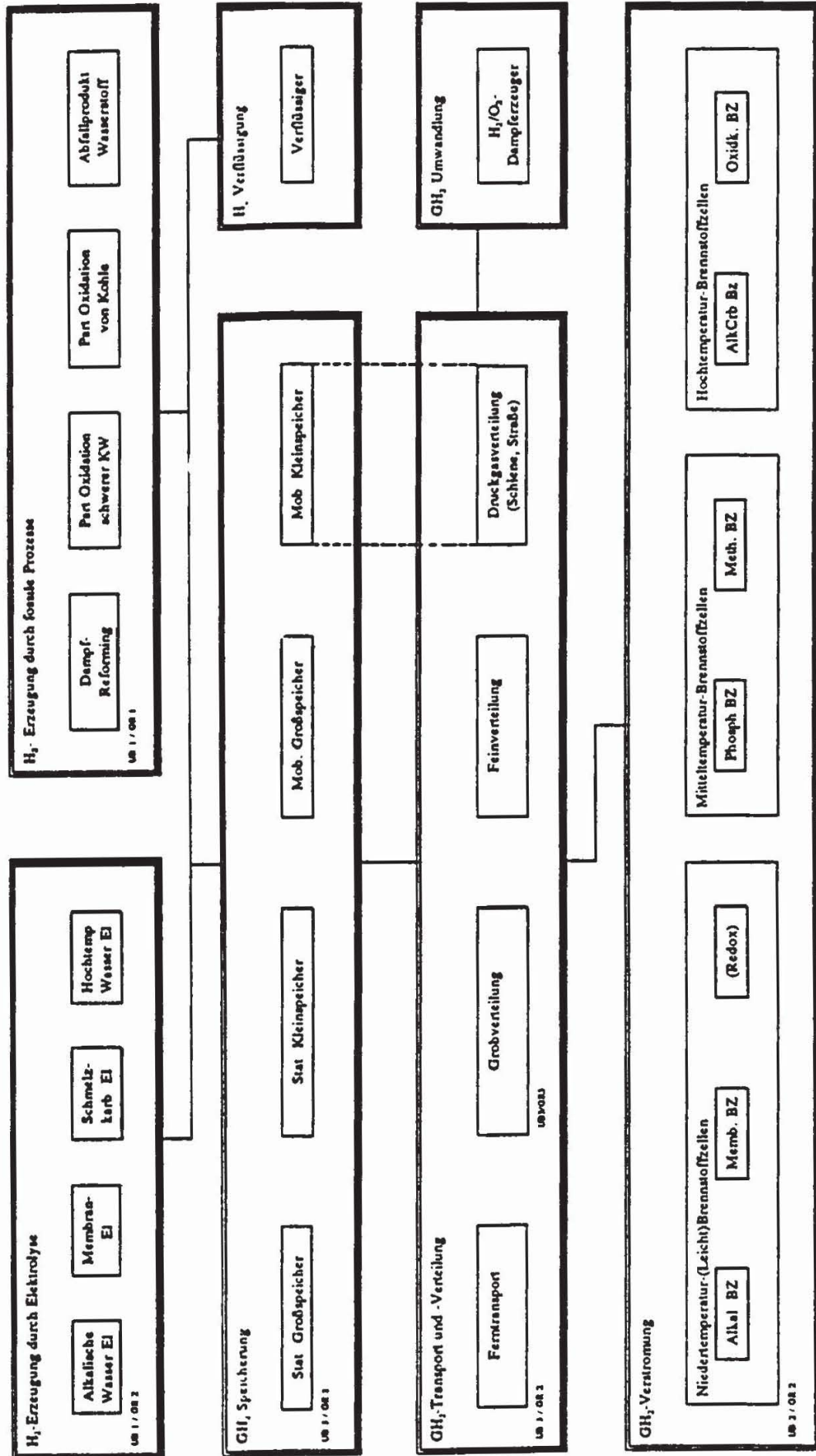


Abb. 10: Systematik der Prozesse für gasförmigen Wasserstoff

Tab. 7: Umweltdaten der Verfahren im Vergleich
Angenommene Kapazität 110.000 m³ H₂/h

| Status 1987 | Erdgas reformierung | Partielle Oxidation | Texaco Steinkohle- vergasung | Koppers- /Totzek Steinkohle- vergasung | Winkler Braunkohle- vergasung |
|--|---------------------|---------------------|---------------------------------|---|-------------------------------------|
| Rohstoff | Erdgas | Schweröl | Steinkohle | Steinkohle | Braunkohle |
| Spez. CO ₂ -Emissionen in kg CO ₂ / m ³ H ₂ | 0,82 | 1,35 | 1,86 | 2,01 | 2,17 |
| CO ₂ -Vermeidung in kg/GJ | 56 | 78 | 92 | 12 | 111 |
| CO ₂ -Depot in kg/GJ | 76 | 126 | 173 | 187 | 202 |
| Mehrkosten für CO ₂ -Vermeidung (Anteil) in DM/t | 102 | 135 | 220 | 262 | 162 |

Tab. 8: Wirtschaftliche Daten der Verfahren
Angenommene Kapazität 110.000 m³ H₂/h

| | Dampf- Reformierung | Partielle Oxidation | Kohlevergasung (Winkler) | Kohlevergasung (Koppers/Totzek) |
|--|------------------------|------------------------|-----------------------------|------------------------------------|
| Investitionen in Mio DM | 120 | 315 | 825 | 635 |
| Umlaufkapital in Mio DM | 14 | 15 | 20 | 18 |
| Gesamtkapital in Mio DM | 146 | 361 | 790 | 716 |
| Kapitalabh. Kosten in Mio DM/a | 22,89 | 58,05 | 127,89 | 115,96 |
| Rohstoff-Einsatz in PJ (10 ⁶ GJ) | 12,81 | 12,99 | 17,01 | 19,09 |
| Rohstoffkosten in Mio DM/a | 90,76 | 87,17 | 64,52 | 187,59 |
| Ges. Betriebskosten in Mio DM/a | 2,23 | 6,71 | 13,00 | 17,35 |
| Spez. H ₂ -Kosten in Pf/m ³ | 13,75 | 17,48 | 23,27 | 36,47 |

Tab. 9: Technologie der Elektrolyse

| Charakteristische Daten | | Einheit | Alkalische Wasserelektrolyse | | | | Stand März 1992 / LBST | |
|--|--|------------------------------------|------------------------------|-------------|-----------------|----------------------------|--|------------------------------|
| | | | AWEL konventionell | | AWEL verbessert | | AWEL fortgeschritten | |
| | | | bipolar Asbest | OH-Ionen | monopolar | bipolar PPS-Pyrox oder NiO | bipolar NiO/Keramit CaTiO ₃ | bipolar emorganische Membran |
| Separations-Methode | | -- | bipolar Asbest | OH-Ionen | OH-Ionen | bipolar PPS-Pyrox oder NiO | bipolar NiO/Keramit CaTiO ₃ | bipolar emorganische Membran |
| Separations-Material | | -- | OH-Ionen | < 3,4 | OH-Ionen | 2,17 | OH-Ionen | OH-Ionen |
| Ioneneitung | | m x m | < 3,4 | | aktiviert | aktiviert | NiCo-aktiviert NiCo-aktiviert | NiCo-aktiviert NiS-aktiviert |
| Separator-Maße | | Anode | Ni-aktiviert | | aktiviert | aktiviert | KOH 30 % | KOH 30 % |
| Elektrodenmaterial | | Kathode | KOH 28 % | | KOH 25 % | KOH 30 % | KOH 30 % | KOH 30 % |
| Arbeitsmedium | | -- | 80 | 80 - 90 | 70 | 80 | < 150 | 100 - 120 |
| Betriebstemperatur | | ° C | 0,105 | 3 | 0,105 | 0,105 | 3 | < 1 |
| Betriebsdruck | | MPa | 2,1 - 1,9 | 2,1 - 1,9 | 1,85 | 1,79 | 1,8 | 1,75 |
| Zellaplanzung | | V | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,76 | < 10 | < 4 |
| Stromdichte | | kA / m ² | 4,6 | 4,6 | 4,4 | 4,35 | 3,9 | 4,1 |
| Energie-Verbrauch | | kWh/Nm ³ H ₂ | 65 | 65 | 69 | 70 | > 77 | 72,81 |
| Wirkungsgrad (U HW) | | % | 65 - 195 | 760 | 45 | 400 | 25 - 550 | 2,4 - 84 |
| Gasproduktion H ₂ pro Einheit | | Nm ³ / h | 20 - 100 | 25 - 100 | 20 - 120 | 20 - 120 | 0 - 130 | 20 - 130 |
| Betriebsbereich | | % | 300 - 900 | < 3.000 | 200 | < 1.800 | 100 - 2.000 | < 100 |
| Erbaßgröße | | kW, | < 200 | > 25 | 7 | 30 | --- | --- |
| Realisierte Systemgröße | | MW, | | | | | | |
| Hersteller | | --- | KREBSKOSMO, ¹⁾ | LURGI | | | MBB/LINDE | **) |
| Prototyp | | --- | KREBSKOSMO | LURGI | ELECTROLYSER | NORSK HYDRO | LURGI | HYDROGEN SYSTEMS |
| Kommerzieller Typ | | --- | | | | | | ABB HAMILTON ST. |
| Spez. Investitionskosten | | DM / kW _e | < 1.000 | 900 - 1.200 | < 800 | 600 | (600) | > 2.000 |
| | | | | | | | | DORNIER WESTINGH ... |
| | | | | | | | | (< 1.000) |

1) PARR, DAVEY BAMAQ, DE NORA, ELECTROLYZER, LURGI, NORSK HYDRO

2) ELECTROLYZER, HYDROGEN SYSTEMS, MBB/LINDE, METSON, NORSK HYDRO, TELETYPE ENERGY, LURGI

Stand März 1992 / LBST

Technologie der Brennstoffzellen

| Charakteristische Daten | Einheit | Niedertemperatur Brennstoffzelle | | | Mitteltemperatur-Brennstoffzelle | | Hochtemperatur-Brennstoffzelle | |
|---------------------------|--------------------|--|---|---|---|--|--------------------------------|--|
| | | AFC | SPFC | PAFC | MCFC | SOFC | | |
| Brenngas | | Wasserstoff | Wasserstoff | 1 Erdgas, Methan 2 Wasserstoff | 1 Erdgas, Methan | 1 Erdgas, Methan | | |
| Oxidationsgas | | Sauerstoff | Sauerstoff | Sauerstoff oder Luft | Luft | Luft | | |
| Elektrolyt | | KOH | Sulfonsäuren fixiert in perfluoriertem Polymer | H ₂ PO ₄ in Matrix fixiert | Li ₂ CO ₃ /K ₂ CO ₃ oder Li ₂ CO ₃ /Na ₂ CO ₃ | ZrO ₂ Membran Y-dotiert | | |
| Ioneneitung im Elektrolyt | | Hydroxyionen | Wasserstoffionen | Wasserstoffionen | CO ₂ -ionen | Sauerstoffionen | | |
| Elektrodenmaterial | | Ag/Ni oder Pt/P auf PTFE | Pt oder Pt RuO ₂ | Pt | NiOL ₂ oder LiFeO ₂ | LaNiO ₃ /LaMnO ₃ , Ni-Co-Keramik | | |
| Betriebs Temperatur | ° C | 80 | 80 | 190 | 650 | 1000 | | |
| Zellspannung | V | 0,75 | 0,72 | 0,6 - 0,7 | 0,7 - 0,9 | 0,6 | | |
| Stromdichte | A /cm ² | 420 | 500 | 250 | 100 - 200 | 250 - 400 | | |
| Wirkungsgrad (Volllast) | % | 63 | 50 - 60 | 45 | 50 - 55 | > 50 | | |
| - elektrisch | % | ... | ... | 30 | 42 | 40 | | |
| Lebensdauer (Zelle) | h | 2 000 | 20 000 | > 10 000 | 10 000 | 16 000 | | |
| Einheitsgröße | kW | < 20 | 20 | 40, 200, 4 500 | 10 | 3 - 25 | | |
| - Prototyp | kW | 7 | ... | 200, 11MW, 5MW, 11MW, | ... | ... | | |
| - kommerzieller Typ | kW | 100 | 100 | X X0 MW | 5 - 50 MW | 10 - 200 | | |
| Systemgröße | Jahr | 1991 | 1991 | 1991 | 1991 | 1995 | | |
| Verfügbarkeit | Jahr | ... | ... | 1992 - 1994 | 2005 - 2020 | 2005 - 2020 | | |
| - Muster | | | | | | | | |
| - für Kraftwerk | | | | | | | | |
| Hersteller | | SIEMENS, ELENCO, IFC, ERC | SIEMENS, BALLARD, ABB, HAMILTON ST. HAMILTON ST | IFC, FUJI, TOSHIBA, MBB, ANSALDO, WESTINGHOUSE IFC, FUJI, TOSHIBA | IHI, FUJI, TOSHIBA, ERC, ANSALDO, HITACHI HITACHI, MBB, MITSUBISHI | WESTINGHOUSE, ETL, DORNIER, ARGONNE, ... | | |
| - Prototyp | | | | | | | | |
| - kommerzieller Typ | | | | | | | | |
| Anwendungen | | Raumfahrt, U-Boote, spez. Straßenfahrzeuge | Raumfahrt | BHKW, Kraftwerke, (evtl. Fahrzeuge) | Kraftwerke | ... | | |
| Spez. Investitionskosten | DM /kW, | 55 000 | 55 000 | 4 900 | 20 000 | 10 500 | | |
| - aktuell | DM /kW, | 4 600 | 5 100 | 2 600 | 1 700 | 2 000 | | |
| - geplant | | | | | | | | |

3.5 Bereich CO₂-Entsorgungstechniken

In der vorgelegten Studie [9] werden ausführlich die unterschiedlichen Möglichkeiten, Kohlenstoff oder CO₂ aus dem fossilen Brennstoffkreislauf zu entfernen und endzulagern dargestellt. Neben begrenzten Möglichkeiten einer CO₂-Entsorgung beim Energie-Endverbraucher kommt es im Kern darauf an, CO₂ aus den großen punktförmigen Quellen des Umwandlungssektors zurückzuhalten und über wenigstens mehrere Jahrhunderte hinweg ohne größere Emission in die Atmosphäre endzulagern. Hauptwege einer CO₂-Entfernung sind die Verbrennung der fossilen Brennstoffe in reinen Sauerstoff anstelle Luft, mit CO₂ als im wesentlichen einzigen gasförmigen Verbrennungsprodukt, oder die Vergasung einschließlich CO₂-Shift-Reaktion mit anschließender CO₂-H₂-Trennung. Tabelle 11 gibt einen Vergleich beider Abtrennverfahren im Fall der Stromerzeugung wieder.

Tab. 11:

Vergleich der CO₂-Abtrennung bei Verbrennung mit reinem O₂ oder im GuD-Kraftwerk /IEA, 1992b/

| Charakteristische Kraftwerksdaten | O ₂ -Verbrennung ohne / mit | | GuD-Kraftwerk ohne / mit | |
|--|---|---------|-----------------------------|---------|
| | CO ₂ -Abtrennung | | CO ₂ -Abtrennung | |
| Elektrische Leistung, MW _d | 500 | 500 | 500 | 500 |
| Bruttoleistung, MW _d | 664,6 | 824,0 | 567,4 | 662,1 |
| Thermischer Wirkungsgrad, % | 30,7 | 24,8 | 41,7 | 35,8 |
| Thermische Leistung MW _{th} (u. Heizwert) | 1 629,3 | 2 020,0 | 1 197,8 | 1 397,7 |
| CO ₂ -Emissionen: kg/MWh _{netto} | 1 069,6 | 13,1 | 809,4 | 210,3 |
| CO ₂ -Abtrennfaktor, % | - | 98 | - | 74 |
| Stromerzeugungskosten: US \$/kWh _d | 0,0846 | 0,1093 | 0,0619 | 0,0780 |
| Prozentuale Verteuerung, % | - | 29,2 | - | 25,9 |
| CO ₂ -Vermeidungskosten: US \$/t CO ₂ | - | 23,3 | - | 26,9 |

Betrachtet wird des weiteren die Möglichkeit, den Kohlenstoff aus fossilen Brennstoffen "abzustrippen" und ohne Verbrennung direkt endzulagern. Damit wird aber auf bis zu 80 % des möglichen Energiegewinns überhaupt verzichtet, was solche Verfahren trotz der günstigen Endlagereigenschaften des Kohlenstoffs stark belastet.

Die vielleicht noch wichtigere Seite als die Abtrennung ist die Endlagerung von CO₂. In Tab. 12 werden die einzelnen Endlagermöglichkeiten (Kapazitäten) für CO₂ abgeschätzt. Als lediglich für einen begrenzten Zeitraum von einigen Jahrzehnten

Tab. 12:

CO₂-Speicherkapazitäten /IEA, 1992a und eigene Berechnungen/

| Speichermethode | Potentielle CO ₂ -Speicherkapazität in Gt C |
|---|--|
| Ozean-Versenkung | 20 x 10 ⁴ * |
| Terrestrische Eisrepositorien | 1.5 x 10 ³ ** |
| Aquifere | 87 *** |
| Leere Erdgasfelder | 83 **** |
| Leere Ölfelder | 42 **** |
| Tertiäre Ölförderung (Enhanced oil recovery) | 4 ***** |
| Künstliche Behältnisse (Ausgelaugte Salzdome etc.) | Niedrig, sehr teuer |

* Auf der Basis von gelöstem anorganischem Kohlenstoff und extrapoliert zur maximalen Löslichkeit von CO₂ in Meerwasser

** Unter der Annahme, daß ein hundertstel Prozent (10⁻⁴) der Landfläche (149 Mio km²) für diesen Zweck reserviert würden. Ein Eisdom gemäß Abb. 3.2 speichert rd. 0.1 Gt/km².

*** Basierend auf gelöstem CO₂ in Wasser

**** Basierend auf den Daten von 1991 über nachgewiesene Öl- und Gasreserven unter der Annahme, daß alle Öl- und Gasreservoirs mit CO₂ aufgefüllt werden können.

***** Basierend auf den Daten 1991 über nachgewiesene Reserven mit der Annahme, daß die tertiäre Ölgewinnung überall angewandt werden kann.

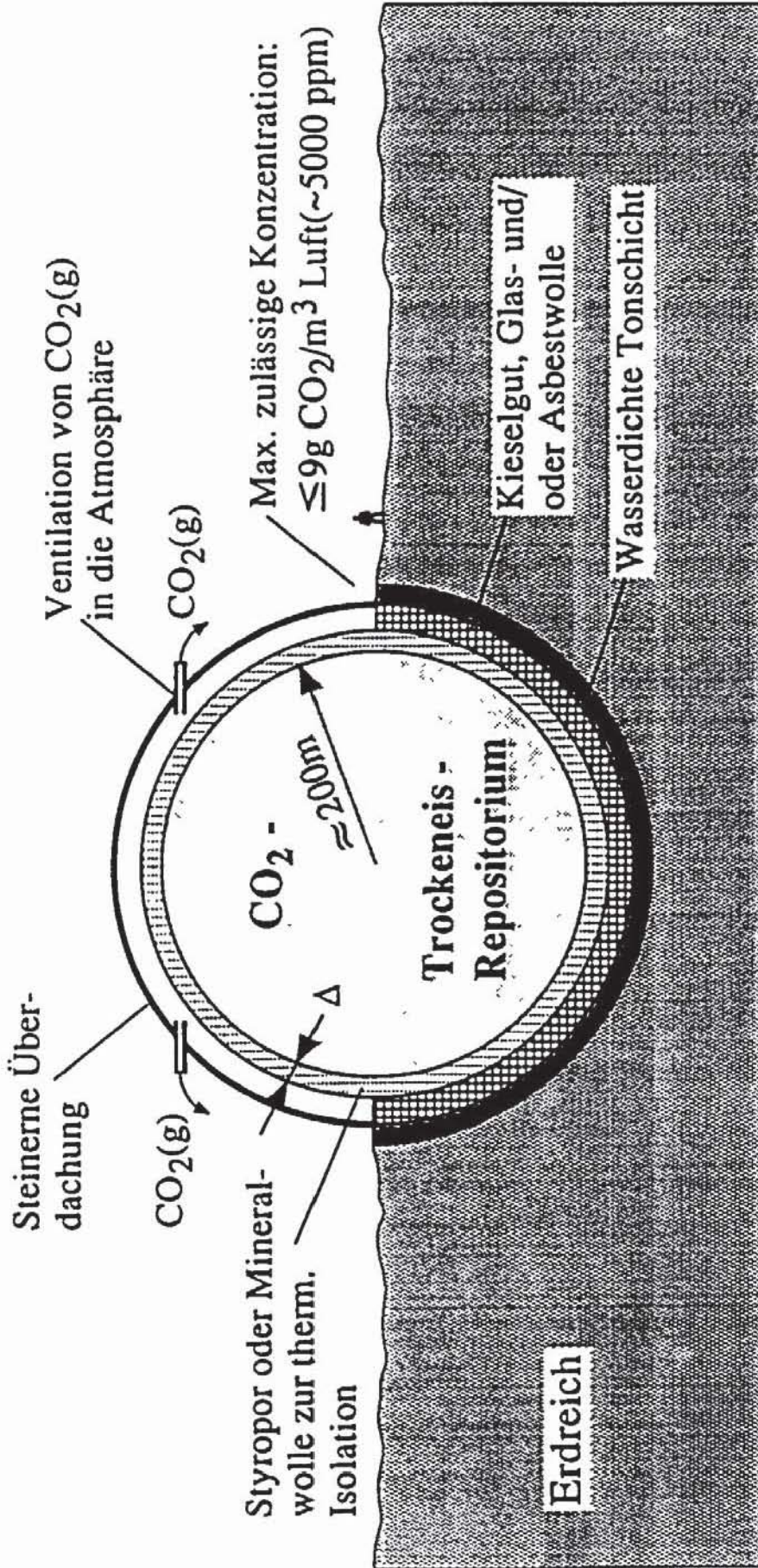


Abb. 11: Das bauliche Grundprinzip eines CO₂-Trockeneisrepositoriums /Seifritz, 1992e,i/

ausreichend können die Möglichkeiten der Verpressung von gasförmigen CO₂ in leere Erdöl- und Erdgasfelder sowie Aquifere angesehen werden. Eine Endlagerung für strategisch relevante CO₂-Mengen, die eine weitgehende klimaneutrale Nutzung der globalen Kohlevorräte ermöglicht, müßte dagegen aus Kapazitätsgründen auf andere Verfahren wie eine Meeresversenkung oder die terrestrische Endlagerung von CO₂-Eis orientieren.

Da im Falle einer Meeresversenkung beim gegenwärtigen Kenntnisstand weder die erforderlichen Rückhaltedauern garantiert, noch die ökologischen Folgen wegen der u. U. großflächigen p-H-Wert-Absenkungen voll überblickt werden können, ist im Verlaufe der Auftragsbearbeitung zunehmend die terrestrische Endlagerung favorisiert worden. Anhand einer idealisierten Kugelgeometrie (siehe Abb. 11) wird die prinzipielle Wirksamkeit des physikalischen Prinzips, d. h. das ausreichende zeitliche Rückhaltevermögen eines solchen Repositoriums, nachgewiesen. Dies hat jedoch noch nichts zu tun mit dem Nachweis einer technischen und ökonomischen Machbarkeit eines solchen Lösungsvorschlages. Die Fragen seiner gesellschaftlichen Akzeptanz bleiben dabei noch völlig offen. Sie können letztlich erst auf der Grundlage praktischer Versuche überhaupt angegangen werden.

4 Wertung und Ausblick

Der gegenwärtige Arbeitsstand im Teilprojekt ist durch den Abschluß von knapp der Hälfte der als Unteraufträge vergebenen oder in eigener Regie des IER zu bearbeitenden Teilaufgaben gekennzeichnet. Zum Teil liegen die Abschlußtermine später oder es gibt Verzögerungen. Das Erreichen eines möglichst baldigen Abschlusses hat höchste Priorität.

- Die bisherigen Zuarbeiten vermitteln in der Regel einen knappen und sehr informativen Überblick über die jeweils betrachteten Teilgebiete des Umwandlungssektors und stellen eine bedeutende Hilfe für deren sachgerechte Modellierung dar. Allerdings gibt es auch deutliche Unterschiede in der diesbezüglichen Handhabbarkeit, die vor allem von der Spezifik des jeweiligen Gegen-

standes abhängen. Tendenziell gilt, daß die modellmäßige Beschreibung komplizierter wird, je stärker die betrachtete Technologie des Umwandlungssektors von örtlichen Gegebenheiten und sonstigen Randbedingungen abhängt. Solche Abhängigkeiten sind ganz besonders bei der Verteilung leitungsgebundener Energieträger zu beobachten.

- * Als derzeit noch offene, aber wichtige Aufgabe ist ein Konsistenzcheck der von den unterschiedlichsten Seiten zugearbeiteten Informationen anzusehen. Insbesondere betrifft das die ökonomischen Daten, die maßgeblich über die Rolle einzelner Techniken in optimalen Reduktionsstrategien entscheiden werden. Es ist davon auszugehen, daß diese Konsistenz gegenwärtig noch nicht erreicht ist. Hierauf deuten nicht zuletzt die Lücken bei den Kostendaten für die Modelljahre 2005 und 2020 in vielen Zuarbeiten hin, die praktisch nur durch möglichst plausible Schätzungen geschlossen werden können.
- * Weitere Anstrengungen sind auf eine standardisierte und aussagekräftige Darstellungsweise vor allem bei den Bestandsdaten zu legen. Zum Teil besteht die Aufgabe in einer sinnvollen Auswahl aus einer größeren Fülle von Primärdaten, z. T. müssen aber Informationslücken erst noch geschlossen werden. Ein Mindestmaß der Darstellungstiefe wird zunächst durch die Forderung definiert, das altersbedingte Aussterben von Anlagenbeständen bzw. den Ersatzbedarf nach Bundesländern gegliedert ausweisen und die damit verbundenen Brennstoffeinsparungen und Emissionsminderungen bestimmen zu können.
- * Neben den Anstrengungen zur Sicherung der Funktionsfähigkeit und Handhabbarkeit des Instrumentariums für Bedingungen einer vorherrschend kontinuierlichen extrapolationen energiewirtschaftlichen Entwicklung sollten im weiteren auch Überlegungen für eine Abbildung möglicher Verwerfungen und Trendwenden Eingang finden. Insbesondere geht es um eine flexible Berücksichtigung sich verändernder Kosten und Preisrelationen, die auch die Technologien des Umwandlungssektors verstärkt betreffen könnten.

Literatur

- /1/ U. Fahl, D. Herrmann, A. Voß, 1992:
IKARUS. Instrumente für Klimagas-Reduktionsstrategien. Zweiter Zwischenbericht zum Teilprojekt 4 "Daten: Umwandlungssektor" IER Stuttgart, Stuttgart, November 1992
- /2/ D. Merten, 1992:
Datenerhebung: Kraftwerke der öffentlichen Versorgung, ehemalige DDR IfE Leipzig GmbH, Leipzig, Dezember 1992
- /3/ J. Giesecke, H.-B. Horlacher, G. Förster 1992
IKARUS, Teilprojekt 4 "Daten Umwandlungssektor" Unterbereich "Wasserkraftwerke > 1 MW"
Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart, Stuttgart, Oktober 1992
- /4/ K. Hedden, A. Gess, 1992:
IKARUS, Teilprojekt "Daten Umwandlungssektor", Bereich Raffinerien und Ölveredelung
Engler-Bunte-Institut der Universität Karlsruhe, Dezember 1992
- /5/ H.-J. Haubrich, 1993:
IKARUS, Teilprojekt 4 "Daten Umwandlungssektor" Bereich "Verteilung und Speicherung elektrischer Energie"
Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft, RWTH Aachen, März 1993
- /6/ H. P. Winkens, 1992:
IKARUS, Teilprojekt 4 "Daten Umwandlungssektor" Unterbereich "Fernwärmespeicherung, -transport und -verteilung", Dezember 1992

- /7/ H. Munser, H. Hilse
IKARUS, Teilprojekt 4 "Daten Umwandlungssektor",
Daten zur Fernwärmeversorgung in den neuen Bundesländern für das Bezugs-
jahr 1989, Dresden, Februar 1993
- /8/ R. Roesler, W. Zittel, 1992:
IKARUS, Teilprojekt 4 "Daten Umwandlungssektor", Unterbereich "Wasser-
stofferzeugung" sowie "Wasserstoffspeicherung, -transport und -verteilung"
Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, Ottobrunn, Dezember 1992
- /9/ W. Seifritz
IKARUS, Teilprojekt 4
Status der CO₂-Entsorgungstechniken, Stuttgart, Dezember 1992