

2.3 Energietechnische Optionen industrieller Produktionssysteme

2.3.1 Gegenstand der Energietechnik

2.3.1.1 Definitionen und Grundbegriffe

Das Energieprinzip ist von fundamentaler Bedeutung. Es gibt keine Naturwissenschaft und technische Wissenschaft in deren Modellen die Energiewandlung nicht von Bedeutung ist. Im naturwissenschaftlichen Sinn stellt Energie eine skalare Erhaltungsgröße dar, die nicht erzeugt oder vernichtet sondern nur in verschiedene Formen umgewandelt werden kann. Sie wird meist als prinzipielle Fähigkeit eines Systems angesehen, Arbeit zu verrichten, wobei der Ausweis dieses Wertes an die Definition von Referenzsystemen und Umwandlungsbedingungen gebunden ist, die für die untersuchte Bilanz konsistent sein müssen. Der Zweite Hauptsatz der Thermodynamik schränkt unter üblichen Umwandlungsbedingungen für eine Reihe von Energieformen (z. B. Wärme) die Umwandelbarkeit ein, so daß die maximale Arbeitsfähigkeit eines Systems durch eine den Zweiten Hauptsatz berücksichtigende Zustandsgröße (für technische Systeme zweckmäßigerweise durch die Exergie) charakterisiert wird.¹

Der physikalische oder thermodynamische Energiebegriff unterscheidet die Energien nach folgenden Eigenschaften: stofffrei oder stoffgebunden, geordnet oder ungeordnet, entropiefrei oder entropiebehaftet, unbegrenzt oder begrenzt in Arbeit bzw. mechanische Energie umwandelbar

Die mechanische Energie ist dabei entropiefrei, d. h. unbegrenzt in Arbeit umwandelbar. Für thermodynamische Systeme unterscheidet man an das System bzw.

¹ Vgl. zur Exergie als Zustandsgröße und anderen Zustandsgrößen, die den 2. Hauptsatz der Thermodynamik zum Ausweis einer maximalen Arbeitsfähigkeit berücksichtigen im 2. Kapitel von W. Fratzscher et al.: Exergie - Theorie und Anwendung.

Stoffe gebundene Energien. Die stofffreien Energieformen Wärme und Arbeit sind dabei Prozeßgrößen, d.h. sie sind von der Art und Weise des durchgeführten Prozesses bzw. der Zustandsänderung abhängig. Wärmen und stoffgebundene Energieformen sind ungeordnet, und die Entropie muß in die Bewertung von Energiewandlungsprozessen einbezogen werden.

Aus technischer bzw. wirtschaftlicher Sicht ergeben sich weitere Dimensionen des Energiebegriffes. Als Primär- oder Rohenergien werden Energieentnahmen aus der Natur bezeichnet. Dabei ist nach Vermögensenergien (Energieressourcen, die sich bei der Entnahme erschöpfen) und Einkommensenergien (Energieressourcen, die durch Prozesse beständig bereitgestellt werden und auch erneuerbare oder regenerative Energiequellen genannt werden) zu unterscheiden.

Bei einer Verfolgung des Flusses in der Energiewandlungskette ist in Nutzen und Verlust zu unterscheiden, wobei die Art der Unterscheidung auch vom Zweck der Systembetrachtung abhängig ist und auch rückwirkend in die Aufwandsdefinition eingreifen kann.² Bei der Verlustanalyse muß die unterschiedliche Umwandelbarkeit der Energien beachtet werden. In diesem Falle erhält man z. T. von einer rein energetischen Analyse grundsätzlich abweichende Aussagen.³

Eine Charakterisierung der Energien nach der Art des angestrebten Nutzens führt zu Wärme und Kälte, mechanischer Energie, Licht und stofflichen Energieträgern wie z. B. Treibstoffe oder Druckluft. Wärme und Kälte unterscheiden sich dabei nach ihrer Lage zur Umgebungstemperatur. Wärme bedeutet Wärmezufuhr oberhalb der Umgebungstemperatur und Kälte Wärmeentzug unterhalb der Umgebungstemperatur, was bei der exergetischen Methode zwanglos berücksichtigt wird.

Energien, die als Zwischenstufen über Verteilungssysteme (Transport und Speicherung) vermittelt werden, werden als Gebrauchs- oder Sekundärenergien bezeichnet. Sie sind je nach den schon durchlaufenen Umwandlungsprozessen oder ihrer Nutzbarkeit außerdem verschiedenen anderen Klassifikationen zuordenbar.

Der Ausweis von Endenergien orientiert sich am Energiemarkt und bedeutet eine Energieabgabe an einen Verbraucher über eine wirtschaftliche Bilanzgrenze. In Energiestatistiken werden diese Abgaben i. a. sektoral dargestellt. Die Darstellung des Verbrauchs an Primärenergien und die Verteilung der Endenergien kann auch in sektoral gegliederten Input-Output-Tabellen erfolgen.⁴

² Vgl. W. Fratzscher, K. Michalek: Die Definition dimensionsloser Gütekriterien für Energiewandlung und Energieanwendung.

³ Neben den Irreversibilitäten spielt die Bewertung der Abenergien, Abwärmen bzw. Abfallenergien eine große Rolle. Vgl: W. Fratzscher et al.: Erfassung des Sekundärenergieanfalles und seine Bewertung (hier wurde wegen eines anderen Begriffssystems Sekundär- gleich Abfallenergie gesetzt).

⁴ Vgl. G. Erdmann: Energieökonomik - Theorie und Anwendungen.

Die Bereitstellung von Nutzenergie wird in modernen Unternehmen häufig mit dem Begriff der Energiedienstleistung verbunden. Damit wird darauf hingewiesen, daß es nicht Ziel der unternehmerischen Tätigkeit ist, Endenergie zu verkaufen, sondern Nutzenergie bereitzustellen.

Der kumulierte Energieaufwand spielt aus energetischer Sicht eine zunehmende Rolle für die Bewertung alternativer Energie- und Stoffwandlungsketten (von den Primärenergien und Rohstoffen bis zum Nutzen). Er summiert alle energetischen Aufwendungen zur Herstellung, dem Gebrauch und der Entsorgung eines Produktes oder der Bereitstellung einer Dienstleistung.⁵ Er drückt damit die energetischen Verflechtungen einer bestimmten Technologie mit der übrigen Industrie bzw. gesamten Volkswirtschaft aus.

Der energietechnische Apparate- und Anlagenbau schafft die Voraussetzungen für die Realisierung von Prozessen der Energieerzeugung, der Energieverteilung und Energieanwendung. Seine Möglichkeiten und die vorhandenen Trends (z. B. neue Werkstoffe, Fertigungsmethoden, Automatisierungs- und Leittechnik) bestimmen damit auch die in der Energietechnik vorhandenen technologischen Optionen.

2.3.1.2 Einheit von Energie- und Stoffwandlung

Eine Beurteilung von Produktionssystemen aus energietechnischer Sicht hat zu beachten, daß jede Stoffwandlung mit einer Energiewandlung und umgekehrt jede Energiewandlung mit einer Stoffwandlung verknüpft ist. Stoffwandlungen aus dem Bereich der Verfahrenstechnik bedeuten energetisch gesehen die Umwandlung oder Bereitstellung von Konzentrations- und/oder Reaktionsenergie, die Bereitstellung von Zerkleinerungs- oder Trennarbeiten u.ä. Das betrifft sowohl die Energieerzeugung als auch die Energieanwendung. So sind die Prozesse im fossil gefeuerten Kraftwerk z. B. mit Stoffwandlungen wie der Verbrennungsreaktion, der Wasseraufbereitung für den Dampfkraftprozeß oder der Reinigung der Rauchgase verbunden. Teilweise liegen ähnliche technologische Lösungen wie in der chemischen Industrie vor.

Verfahren der stoffwandelnden Industrie wie der chemischen Industrie oder Metallurgie sind durch ein komplexes Netz von Stoffwandlungs- und Energiewandlungsprozessen miteinander verbunden. Bei der Komplexität vieler Verfahren läßt sich methodisch kaum noch eine Trennung in Energieträger und Rohstoffe oder Zwischenprodukte vornehmen. Teilsysteme sind entweder eher der Energietechnik oder der Stoffwandlung zuzuordnen. Die energieautarke Anlage ist ein Beispiel

⁵ S. a. VDI-Richtlinie: Kumulierter Energieaufwand - Begriffe, Definitionen, Berechnungsmethoden und W. Mauch: Methodik zur ganzheitlichen energetischen Bewertung.

dafür, daß der Energiebedarf ausschließlich durch die energetische Nutzung der Rohstoffe, i. a. in Verbindung mit exothermen Reaktionen gedeckt wird.

Außerdem ist die energetische Nutzung von Abprodukten durch Verbrennung analog einer Abwärmenutzung in vielen Bereichen der Stoffwandlung gängige Praxis.

Eine besondere Art der energetischen Abfallverwertung tritt bei der Müllentsorgung auf. Der Vergleich des kumulierten Energieaufwandes⁶ zeigt die Konkurrenzsituation zwischen stofflicher und energetischer Nutzung.

Neben der Kopplung von Stoff- und Energiewandlung spielt die Substituierbarkeit der Energieträger untereinander und die Substitution von Stoffen durch Energieträger für die Optionen zur Gestaltung industrieller Systeme eine entscheidende Rolle.

Die Substitution von Primärenergieträgern mit unterschiedlichen Kohlenstoff- oder Schwefelgehalten und mit unterschiedlichen erzielbaren Verbrennungstemperaturen führt z. B. zu einem unterschiedlichen CO₂- und Schadstoffausstoß, unterschiedlichen Wirkungsgraden und einer unterschiedlichen Ökobilanz.

Zum anderen lassen sich viele organischen Produkte der chemischen Industrie alternativ aus Kohle, Erdöl oder Erdgas erzeugen.

2.3.1.3 Energieversorgung

Unter Energieerzeugung soll die erste Energiewandlungsstufe in der Energiewandlungskette, die Wandlung von Primär- oder Rohenergie in Sekundär-, Gebrauchs- bzw. Endenergie verstanden werden. Die Bedeutung dieser Stufe wird sichtbar, wenn man bedenkt, daß in dieser Stufen schon etwa 24,5 % der Primärenergie der BRD als Verlust abgeführt werden⁷. Bedenkt man außerdem, daß die Endenergieträger Kohle, Öl bzw. Treibstoffe und Gas im wesentlichen nur einen Energietransit durch die erste Umwandlungsstufe von etwa 60,8 % des Inputs darstellen, wird die Bedeutung energietechnischer Untersuchungen für diese Stufe noch unterstrichen, da der Verlustenergieanteil an der umgewandelten Energie immerhin ca. 62,5 % beträgt.

Für die Energiewandlungsprozesse spielt die Bereitstellung von Wärme- und Elektroenergie die entscheidende Rolle. Dies kann mit unterschiedlichen Technologien aus unterschiedlichen Primärenergien erfolgen, was ein selbständiges Bewertungsproblem und verschiedene Optionen für die Systementwicklung sichtbar

⁶ Vgl. H. Schaefer: Energiewirtschaftliche Bedeutung der Nutzung von Abfallenergie.

⁷ Vgl. RWE: Energieflußbild der BRD 1992.

macht. Die Bereitstellung von Treibstoffen (vorwiegend über Erdölraffinerien) stellt eine Stoffwandlung dar, deren Zielprodukt ein Energieträger ist.

Energieform	Transportfähigk.	Speicherfähigkeit
chemische Energie (Brennstoffe, Treibstoffe)	interkontinental	Jahre
Elektroenergie	kontinental	als Energieträger nur nach Umwandlung (z.B. elektrochem. Speicher, Pumpspeicherwerk)
Wärme	einige 10 km	Stunden bis Tage
Kälte	einige 100 m	Stunden

Tabelle 2.3-1

Qualitative Transport- und Speichereigenschaften verschiedener Energieformen (Einschätzung der Wirtschaftlichkeit zum gegenwärtigen Zeitpunkt)

Für die Endenergiebereitstellung sind sowohl dezentralisierte als auch zentralisierte Systeme denkbar. Dabei ergibt sich ein Bewertungs- und Optimierungsproblem zwischen Erzeugungsanlage und Verteilungssystem, was zu unterschiedlichen Systemen in Abhängigkeit von der Energiebedarfsdichte und ihrer Zeitabhängigkeit führt. Die unterschiedlichen Energiewandlungstechnologien haben dabei funktional grundsätzlich unterschiedliche Zusammenhänge zwischen Nennleistungsgröße und Aufwand für die Anlage, d. h. es gibt Technologien, die bei einer dezentralisierten Energieversorgung (z. B. BHKW, einfache Heizkessel, Solarenergienutzung) und solche die bei einer zentralisierten Energieversorgung (z. B. Kernkraftwerke, GuD-Kraftwerke) zu bevorzugen sind, soweit die Umwandlungstechnologie grundsätzlich konkurrenzfähig ist.⁸

Die Energieverteilung bildet zusammen mit der Energieerzeugung die Energieversorgung. Aus technischer Sicht sind dabei Transport- und Speicherprozesse zum Ausgleich regionaler und zeitlicher Unterschiede zwischen Angebot und Bedarf zu realisieren.⁹

Die Transportprozesse ergeben sich dabei aus möglichen Standorten für Primärenergieentnahme aus der Natur, für Energieerzeugungsanlagen und der Verteilung der

⁸ Vgl. z. B. J. O'M Bockris, E. W. Justi: Wasserstoff - Energie für alle Zeiten - Konzept einer Sonnen-Wasserstoff-Wirtschaft und K. Köthe: Stromversorgung mit Solarzellen - Methoden und Anlagen für die Energieaufbereitung.

⁹ Ausführungen zur Lösung der Probleme bei K. Kugeler, P.-W. Philippen: Energietechnik - technisch, ökonomische und ökologische Grundlagen.

Endenergienutzer. Im Zusammenhang mit den Optionen der Wasserkraftnutzung und Sonnenenergienutzung in wenig industrialisierten Gebieten wird die Möglichkeit eines „Global Link“ erwogen und bezüglich der Elektroenergie schon mit den skandinavischen Ländern realisiert.¹⁰

Die notwendigen Speicherprozesse haben ihre Ursachen in natürlichen Prozessen (Ungleichmäßigkeit des Anfalls von Wind und Sonnenenergie, Ungleichmäßigkeit des Beleuchtungs- und Heizwärmebedarfs) und sozialen Prozessen (Arbeitszeitorganisation, Freizeitgestaltung). Aus dem daraus resultierenden, statistisch bekannten Jahres-, Wochen- und Tagesgang des Energiebedarfes kann die Notwendigkeit von Speicherprozessen oder das Vorhalten von Leistungsreserven bei den Energieerzeugungsanlagen bestimmt werden. Im Zusammenhang mit neuen Energiekonzepten (besonders bei der Nutzung von Wind- und Sonnenenergie) ergeben sich neue Systemanforderungen. Die in Tabelle 2.3-1 dargestellten qualitativen Speicher- und Transporteigenschaften unterschiedlicher Energieformen verdeutlichen dabei die zu beachtenden Randbedingungen.

2.3.1.4 Energieanwendung

Die Energieanwendung umfaßt die Umwandlung der Endenergie in Nutzenergie. Sie ist durch eine große Vielfalt technischer und technologischer Prozesse mit sehr unterschiedlicher Effektivität gekennzeichnet und bestimmt durch ihre Nachfrage den Bedarf an Primärenergie. Die Gestaltung ihrer Effektivität unter Ausnutzung der technischen Möglichkeiten ist Gegenstand der rationellen Energieverwendung. Die Größe der Energienachfrage wird dabei nicht nur durch die technischen Möglichkeiten, sondern auch durch Marktmechanismen, gesetzliche Randbedingungen, Infrastruktur, Einstellungen und Lebensstile geprägt.¹¹

2.3.1.5 Technologische Vielfalt und Auswahl von Optionen

Im Bereich der Energietechnik wird eine sehr große technologische Vielfalt zur Erreichung prinzipiell ähnlicher Energiedienstleistungen für die menschliche Ge-

¹⁰ Vgl. z. B. zum „Global Link“ VDI-Nachrichten vom 6.1.95, zum „Wasserkraftstrom aus Norwegen“ VDI-Nachrichten vom 19.5.95 und VDI-Bericht: Global Link - Interkontinentaler Energieverbund.

¹¹ Vgl. zur Entwicklung von Energiemärkten und zur Energieprognose G. Erdmann: Energieökonomik, zum Einfluß von Lebensstilen VDI-Bericht: Lebensstandard, Lebensstil und Energieverbrauch und zur Struktur des Energiebedarfs H. Schaefer: Struktur und Tendenzen in der Industriellen Energiebedarfsdeckung.

sellschaft sichtbar. Welche technologischen Varianten von Energiewandlungsketten künftig eine möglicherweise dominierende volkswirtschaftliche Bedeutung erlangen werden, ist kaum vorauszusehen. Hier haben sowohl das Innovationstempo der untereinander konkurrierenden Techniken als auch die gesellschaftlichen Randbedingungen einen entscheidenden Einfluß. Auf Grund der langfristigen Investitionsprozesse sind einmal errungene Anteile einzelner Wandlungsketten nur mittelfristig zu substituieren. Andererseits können unter zeitweiligen Sonderbedingungen errungene Marktanteile relativ schnell wieder verloren gehen, wenn eine Änderung der Randbedingungen zu völliger Unrentabilität führt.

Mögliche Entwicklungspfade und Optionen werden oft in Szenarien untersucht, die häufig in Prognosen münden oder einen Handlungsbedarf an die Politik ableiten. In den entsprechenden Teilen der folgenden Abschnitte wird auf solche Untersuchungen hingewiesen. Diese Szenarien stecken mögliche Grenzen und den Zeitrahmen für zukünftige Entwicklungen ab, soweit man bestimmte Ziele erreichen will oder Veränderungen erwartet. Der schonende Umgang mit der Ressource Umwelt spielt unter den anzustrebenden Zielen eine zunehmende Rolle.

Die folgenden Ausführungen sollen die Vielfalt der möglichen Optionen begründen und gleichzeitig eine Methodik zu ihrer Bewertung bereitstellen. Dabei wird bewußt eine eindeutige Favorisierung einzelner Entwicklungen vermieden. Es wird vielmehr auf die verschiedenen, möglichen Entwicklungen unter bestimmten Randbedingungen hingewiesen. Ziel ist die Erarbeitung von Strategien für eine rationelle Energietechnik und -wirtschaft. Rationell soll in diesem Zusammenhang eine Optimierung der Ressourceninanspruchnahme zur Befriedigung der menschlichen Bedürfnisse bedeuten. Unter Einbeziehung der Ressource Umwelt wird der Versuch unternommen, die Frage zu beantworten, was „nachhaltige Entwicklung“ bedeuten könnte.

Die Ergebnisse können mögliche Entscheidungsprozesse nicht vorwegnehmen - auch wenn Erwartungen über zukünftige Entwicklungen geweckt werden. Es sollen Entscheidungspfade aufgezeigt und eine Methodik zur Entscheidungsfindung aus energietechnischer Sicht bereitgestellt werden.

2.3.2 Energie und Gesellschaft

2.3.2.1 Historische Dimension

Die Gewährleistung einer kontinuierlichen Energieversorgung ist eng mit der sozialen Entwicklung der menschlichen Gesellschaft verbunden.¹² Eine Voraussetzung für die Entwicklung der menschlichen Zivilisation war die Beherrschung des Feuers und damit der im Holz gespeicherten Energie.

Eine spätere Etappe der menschlichen Zivilisation war durch die Einführung des Ackerbaus (neolithische Revolution), beginnende Arbeitsteilung und den Aufbau städtischer Infrastrukturen bestimmt. Die wesentlichen Energiequellen bildeten neben Holz, tierischer und menschlicher Energie, Wasser- und Windkraft.

Die Neuzeit ist durch Mechanisierung und industrielle Revolution gekennzeichnet. Die besonders mit dem Bergbau und der Metallurgie verbundene Nutzung der Wasserkraft und von Holz als Brennstoff- bzw. Reduktionsmittel¹³ wurde zunehmend durch Maschinenarbeit aus Dampfmaschinen und die Nutzung von Kohle ersetzt.

Dabei war der Weg von den ersten technischen Anwendungen bis zu den heutigen modernen Maschinen relativ lang. Er belegt die Entwicklung des Maschinenbaus und der heutigen Energietechnik. Die Dampfmaschine von J. Watt und erste Untersuchungen zu Wirkungsgraden von Kolbendampfmaschinen von J. Smeaton datierten 1769, während Kolbendampfmaschinen mit Frischdampfparametern von 450°C und 20 bar bzw. die erste Parsons-Turbine mit 1 MW im Kraftwerk Elberfeld erst um 1900 realisiert wurden und die erste Kraftwerksgasturbine erst 1940 bei Zürich eingesetzt wurde. Diese lange Phase von den ersten technischen Realisierungen bis zu einer nach heutigen Gesichtspunkten relativ effektiven Technik ist auch auf das Fehlen wissenschaftlicher Grundlagen zurückzuführen. Die maschinentechnische Entwicklung erfolgte am Anfang durch findige Mechaniker nach der Methode „Versuch und Irrtum“. Wesentliche thermodynamische Grundlagen zur Verbesserung der Effektivität, z.B. Berechnung des Kreisprozeßwirkungsgrades von Sadi Carnot 1824, wurden erst relativ spät gelegt. Nach der Feststellung des mechanischen Wärmeäquivalents (1841) und der Formulierung des Energieerhaltungssatzes (1845) durch J. R. Mayer sowie J. P. Joule und H. Helmholtz standen erst ab Mitte des vorigen Jahrhunderts die

¹² Vgl. zu philosophischen und evolutionstheoretischen Aspekten der Energie in G. Erdmann: Energieökonomik - Theorie und Anwendungen.

¹³ Angaben zur Entwicklung des Energiebedarfs, angewandten Techniken, Entwicklungen in verschiedenen Gewerken bzw. Bereichen und Zeittafeln sind zu finden in P. Krämer: Entwicklung der Energietechnik und deren Wechselwirkungen mit der Umwelt.

wichtigsten Grundlagen für eine allgemeine technische Energielehre, der Erste und Zweite Hauptsatz der Thermodynamik, zur Verfügung.

Die moderne Energietechnik ist durch die Elektrotechnik geprägt, die ihre technische Grundlage durch die Entdeckung des dynamoelektrischen Prinzips durch W. Siemens (1866) erfuhr. Die industrielle Entwicklung war durch erste Kraftwerke vorwiegend zur Beleuchtung in Großstädten wie Berlin und den zunehmenden Bau von Großkraftwerken in Verbindung mit der Entwicklung der Großindustrie ab der 20er Jahre des 20. Jahrhunderts in Deutschland geprägt. Maschinentechnisch erfolgte zunehmend der Ersatz von Dampfmaschinen und Transmissionen durch dezentrale Elektroantriebe. Durch die günstige Transportfähigkeit, die universelle Umwandelbarkeit und die günstige Einsetzbarkeit zur Automatisierung und Informationsverarbeitung nimmt die Bedeutung der Elektroenergie bei der Endenergienachfrage auch heute noch zu.

Der Primärenergiemix war seit der industriellen Revolution mehreren starken Veränderungen unterworfen. Zuerst wurde durch Ressourcenerschöpfung und Industrialisierung des Bergbaus das Holz durch die Kohle verdrängt, so daß bis zum Ende des zweiten Weltkrieges Kohle der dominierende Energieträger war. Durch die Elektrifizierung konnte die sporadisch anfallende Windenergie nicht mehr konkurrieren, während sich die Wasserkraftnutzung auf günstige Standorte beschränkte. Danach war eine Globalisierung des Primärenergiemarktes für Erdöl, verbunden mit der Verlegung von Erdölpipelines und der Entwicklung von Großtankern, zu verzeichnen, die Erdöl auch in Verbindung mit seiner Bedeutung zur Treibstoffherstellung zum dominierenden Energieträger machte. Vorteilhaft sind die geringen Preise, als Nachteil erweist sich die Abhängigkeit von wenigen Förderländern. Die Wasserkraftnutzung wurde durch investitionsintensive Großprojekte (UdSSR, USA, Ägypten) forciert. Die Kernenergie erwies sich ab Ende der 60er Jahre zum weitgehend ressourcenunabhängigen Prestigeobjekt im Ost-West-Konflikt und erhielt mit der politisch motivierten, durch die arabischen Länder hervorgerufenen Erdölkrise weiteren Auftrieb. Durch die Besonderheiten der Kostenstruktur von Kernkraftwerken ergaben sich bald Kostenvorteile gegenüber fossilen Energieträgern. Mit dem Problem einer möglichen Ressourcenverknappung setzte eine verstärkte Erdgasnutzung ein, die auch an neue technische Systeme wie Erdgasverflüssigung, Erdgaspipelines und Flüssiggastanker gebunden war. Neue Lagerstätten für Erdöl und Erdgas, auch im technisch schwierigen Offshore-Bereich vor Großbritannien und Norwegen, wurden erschlossen. Die Entwicklung ist in Abbildung 2.3-1 dargestellt.¹⁴

¹⁴ S. Anhang der Diss. von P. Krämer.

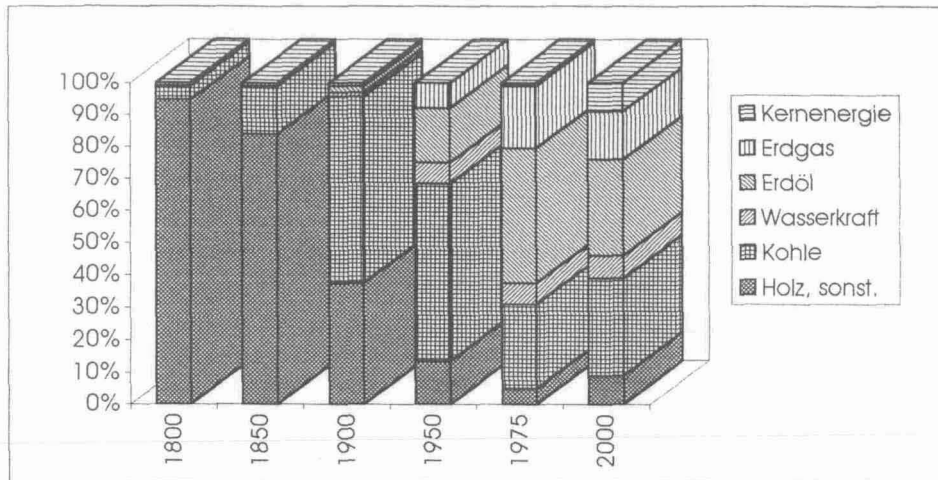


Abbildung 2.3-1

Anteil verschiedener Energieträger am Primärenergieaufkommen der Welt aus historischer Sicht

Ein solcher Strukturwandel in den Energiesystemen kann auch durch logistische Wachstumsmodelle nachvollzogen oder prognostiziert werden.¹⁵

Anthropogene Umweltveränderungen, die nicht nur mit der industriellen oder energiewirtschaftlichen Entwicklung verbunden waren, spielten auch in der Vergangenheit eine große Rolle.¹⁶ So ist das Ende der 5000jährigen Hochkulturphase in China nicht zuletzt eine Folge des Verlustes 2/3 seiner Anbaufläche durch Bodenerosion und -versalzung infolge Bevölkerungswachstums, folgte der Abholzung 1400 v. Chr. auf Kreta ein Niedergang der minoischen Kultur, verursachten Griechen und Römer 400 - 300 v. Chr. durch Waldabholzung lokale Klimaveränderungen in Nordafrika und durfte 300 v. Chr. in der Nähe der griechischen Stadt Sunion aufgrund der Emissionen beim Schmelzen silberhaltiger Bleierze kein Vieh geweidet werden. Die großen Rodungen in Europa bis zum 13. Jahrhundert zur Gewinnung landwirtschaftlicher Flächen für die wachsende Bevölkerung führten zu Verkarstungen, Verwüstungen und Holzverknappung, was den Papst zum Holzausfuhrverbot christlicher Länder in die arabische Welt veranlaßte. Die

¹⁵ Vgl. zum Modell in C. Marchetti: Primary Energy Substitution Model und C. Marchetti, N. Nakicenovic: The Dynamics of Energy Systems an the Logistic Substitution Model, zum Zeitfaktor beim Übergang zu neuen Versorgungsstrukturen in G. Erdmann: Energieökonomik - Theorie und Anwendungen.

¹⁶ Vgl. zu anthropogenen Umweltveränderungen in der Diss. von P. Krämer.

Kohlefeuerung in England aufgrund der Holzknappheit führte im 17. Jahrhundert erstmalig zu Smog in größerem Umfang.

Mit der Industrialisierung traten Umweltprobleme im Zusammenhang mit verschiedenen Gewerben wie z. B. Sodafabriken, Hütten und Ofenanlagen auf. Die Emissionen wurden i. a. durch Gewerbeordnungen geregelt. Mitte des 19. Jahrhunderts gab es erste wissenschaftliche Untersuchungen zu Emissionsschäden (Stöckhardt, v. Schröder, Chemiker und Botaniker der Freiburger Hochschule). Das Problembewußtsein wuchs und führte zur Ergreifung von Maßnahmen, nachdem im Dezember 1952 im Londoner Smog 4000 Menschen ums Leben kamen. 1958 gab es die erste VDI-Richtlinie zur Emissionsminderung, 1964 folgte die Technische Anleitung zur Luftreinhaltung (TA-Luft) in der BRD und 1974 das Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG). Die anthropogene Umweltbeeinflussung, insbesondere der Treibhauseffekt durch bei der Energiewandlung entstehendes CO₂, wird heute in weiten Bereichen als noch bedeutender eingeschätzt als Ressourcenprobleme bei Energieträgern.

2.3.2.2 Betriebswirtschaftliche Dimension

In der Energiewirtschaft sind insbesondere die vom Betrieb der Anlage unabhängigen Aufwendungen (konstante Kosten, vorwiegend für Investitionen und Kapitaldienste) und die vom Betrieb der Anlage abhängigen Aufwendungen (variable Kosten, vorwiegend für Brenn- und Hilfsstoffe) gegenüber zu stellen. Dabei weisen unterschiedliche Energierzeugungsanlagen unterschiedliche Kostenstrukturen auf, die auch ihre bevorzugten Einsatzbereiche und ihre optimale Auslegung prägen.¹⁷

Aufgrund der relativ langen Investitions- und Nutzungszeiten für große Energieanlagen, der im Vergleich zu anderen Wirtschaftsbereichen überdurchschnittlichen Kapitalbindung und der Möglichkeit der Befolgung unterschiedlicher Ausbaustrategien muß der Zeitfaktor über Prognosemodelle zur Absatz- und Kosten-

¹⁷ Vgl. zu allgemeine Betrachtungen von Wirtschaftlichkeitsfragen in der Energiewirtschaft, speziellen Kostenanalysen und Optimierungsfragen: K. Kugeler, P.-W. Philippen: *Energietechnik - Technische, ökonomische und ökologische Grundlagen*, zur Wirtschaftlichkeit des Energiesparens, Investitionsstrategien und Methoden der Wirtschaftlichkeitsrechnung und zur Wirtschaftlichkeit als Kostenrechengröße H. L. von Cube: *Handbuch der Energiespartechiken*, Bd. 1 Technische und wirtschaftliche Grundlagen, zur Wirtschaftlichkeitsanalyse von Energiesystemen, Investitionsrechenverfahren zur rationellen Energieverwendung, weiterführenden wirtschaftlichen Bewertungsverfahren und Grundlagen der Finanzierung D. Winje, D. Witt: *Energiewirtschaft*, Bd. 2 der Handbuchreihe Energieberatung / Energiemanagement.

entwicklung und Anforderungen zur Kapitalverzinsung mit in die Betrachtung einbezogen werden. Dies macht die Forderung der Energiewirtschaft nach planbaren Rahmenbedingungen für ihre Systeme deutlich.

Durch die Überlagerung von variablen und konstanten Kosten entsteht ein Optimalproblem. Aufgrund thermodynamischer und prozeßtechnischer Zusammenhänge ergibt sich nach der Grundsatzentscheidung über die Art der Technologie die Tendenz, daß kapitalintensive Anlagen energiesparsamer sind. Für die Lage des Optimums ist das Verhältnis zwischen spezifischen festen und variablen Kosten entscheidend (Abbildung 2.3-2).¹⁸ Der absolute Wert beeinflusst zwar die Kosten der Produkte, nicht aber die Lage des Optimums. Das bedeutet in der Konsequenz, daß spezifische Primärenergieverteuerungen, Senkungen der Kapitalzinsen, bessere Auslastungen der Anlagen und längere Anlagenlebensdauern zu einer Energieeinsparung führen. Dabei sind allerdings Wechselwirkungen mit anderen technischen Systemen zu beachten, z. B. wirkt eine spezifische Primärenergieverteuerung über den Anlagenbau und damit Investitionen auch auf die konstanten Kosten, so daß sich das Ergebnis bei einer wesentlichen Verteuerung der Produkte nicht vollständig in die gewünschte Richtung verschiebt. Einen ähnlichen Einfluß können verschärfte Umweltauflagen haben, die die Anlagen spezifisch verteuern.

Da sich die wirtschaftlichen Randbedingungen ebenso wie die technischen Innovationen ständig ändern, erscheint eine zeitweise Reoptimierung energietechnischer Anlagen angezeigt. Allerdings wird durch die schon vorhandene Kapitalbindung nicht das gleiche Optimum wie bei der Auslegung einer Neuanlage erreicht.¹⁹

Da Elektroenergie nur nach Umwandlung und insgesamt nicht wirtschaftlich gespeichert werden kann, ist durch die Schwankung des Bedarfes (Tages, Wochen-, Jahresgang) eine vollständige Auslastung der Erzeugungsanlagen nicht möglich. Die Versorgungsstrategie in einem Versorgungsnetz besteht darin, den Bedarf ergänzend durch Grundlast-, Mittellast- und Spitzenlastkraftwerke zu decken (Abbildung 2.3-3). Diese unterscheiden sich nicht nur im technischen Konzept sondern auch in der Kostenstruktur. Grundlastkraftwerke sind die kapitalintensivsten und energetisch effektivsten Kraftwerke. Die optimale Auslegung dieser Kraftwerke und die Festlegung ihrer Einsatzbereiche ist ein Supremalproblem. Die Abgabe nennenswerter Energiemengen ins Netz (z. B. bei der Nutzung von Wind- oder Solarenergie), die nicht dem Bedarf folgen, beeinflussen die Wirtschaftlichkeit dieser Strategie.

¹⁸ Vgl. zur thermoökonomischen Optimierung W. Fratzscher u.a.: Exergie - Theorie und Anwendung.

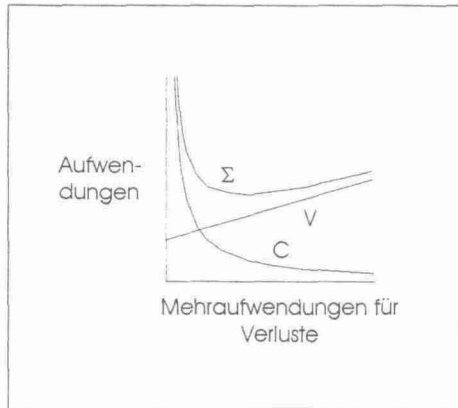


Abbildung 2.3-2

Optimalprobleme in der Energietechnik

C - Konstanter Aufwand

V - Variabler Aufwand

Σ - Summe mit Minimum

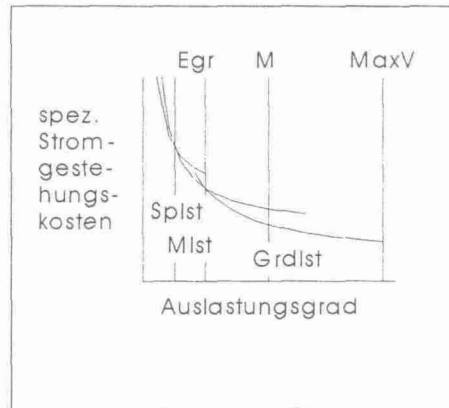


Abbildung 2.3-3

Supremalprobleme der Energietechnik.

Splst, Mlst, Grdlt: Spitzenlast-,

Mittellast-, Grundlastkraftwerk.

Egr: Einsatzgrenzen,

M: Mittelwert des Gesamtsystems,

MaxV: Maximale Verfügbarkeit.

Die Kostenstruktur beeinflusst auch die Preisbildung entsprechend der Tarifbedingungen²⁰ und die Preise für Sondervertragskunden. Bei der Komplexität der Zusammenhänge kann die Forderung nach der Verbindung von Kostenverursachung, Förderung einer rationellen Energieverwendung und Sozialverträglichkeit nur angenähert erfüllt werden.

Die Tarife führen in Unternehmen der Energieanwendung bezüglich der Energieentnahme aus dem Netz zu einem eigenen Optimierungsproblem, das über das Energiemanagement Auswirkungen auf die Betriebsorganisation und die Fahrweise eigener Erzeugungsanlagen hat.

Zu kritisieren ist an einer rein betriebswirtschaftlichen Optimierung der Energieerzeugung und -anwendung, daß in der Volkswirtschaft eine Reihe von Kosten entstehen (z.B. für Gesundheitsschutz, Abfallentsorgung, Auswirkungen von Schadstoffen auf andere Bereiche), die nicht in den betriebliche Kosten enthalten

¹⁹ Das zeigt z. B. die Situation beim Reengineering von Wärmenetzen zur Senkung des Energiebedarfes. Vgl. B. Linnhoff: Pinch analysis - a state-of -the art overview, B. Linnhoff et al.: User guide on process integration for the efficient use of energy.

²⁰ Aufgrund der Monopolstellung bei den leitungsgebundenen Energieträgern Elektroenergie und Erdgas müssen durch die Energieversorgungsunternehmen (EVU) für Tarifkunden in der BRD die allgemeinen Versorgungsbedingungen (AVB) und Bundestarifordnungen (BTO) eingehalten werden.

sind. Sie werden als externe Kosten bezeichnet und können größer als die ausgewiesenen internen Kosten sein. Ihre Internalisierung z.B. über Steuern oder Abgaben scheint aber auch an der Schwierigkeit ihrer Quantifizierung zu scheitern.²¹ Die z.Z. geführte Diskussion zur Energie- bzw. CO₂-Steuer scheint sich dahingegen weniger an der Verursachung ökonomisch meßbarer Aufwendungen als am Ziel einer Veränderung des jetzigen Energiesystems und nebenbei auch des Steuersystems zu orientieren.

2.3.2.3 Volkswirtschaftliche Dimension

Allgemein kann für die Entwicklung einer Gesellschaft ein Zusammenhang zwischen wirtschaftlichem Wohlstand, Energieverbrauch und Bevölkerungswachstum angenommen werden. Die Einkommenselastizität, der Zusammenhang zwischen Einkommenssteigerung und Steigerung des Energieverbrauchs, kann dabei allerdings starken Schwankungen unterworfen sein.

Der spezifische Energiebedarf pro Kopf der Bevölkerung zeigt einen starken Unterschied zwischen Entwicklungs- und Industrieländern. Dabei ist allerdings zu beachten, daß in den Entwicklungsländern etwa ein Drittel bis zur Hälfte des Energiebedarfes nichtkommerziell gedeckt wird. Mit der Industrialisierung der Entwicklungsländer wird deren Energiebedarf stark ansteigen. In den Industrieländern vorhandene Unterschiede im Energiebedarf haben ihre Ursachen in klimatischen Unterschieden (z.B. erfordert eine Komfort-Klimatisierung in Äquatornähe einen beträchtlich höheren Energieaufwand als die üblicherweise ausreichende saisonale Beheizung unter mitteleuropäischen Verhältnissen), Unterschieden im allgemeinen Wohlstand und auch Unterschieden in der preislichen Bewertung der Energieträger im Vergleich zu den Einkommen.

Die in Abbildung 2.3-4 dargestellten Trends der Energieintensitäten belegen eine mit der Industrialisierung wachsende Energieintensität und eine anschließende Senkung im Zusammenhang mit volkswirtschaftlichen Strukturprozessen. Dabei ist hervorhebenswert, daß nach der Erdölkrise 1974 aufgrund von Spar- und Effektivitätserhöhenden Maßnahmen in Deutschland und anderen Industrieländern nicht nur die Energieintensität sank, sondern auch ein steigendes Bruttosozialprodukt (+56 % real, 1994 i.Vgl. zu 1973 alte Bundesländer) bei stagnierendem Primärenergieverbrauch (+8 %, 1994 i.Vgl. zu 1973 alte Bundesländer)²² erwirtschaftet wurde. Das erforderte sowohl Kapitalbereitstellung als auch technische Innovation.

²¹ Vgl. VDI-Bericht: Soziale Kosten der Energienutzung: Externe Kosten heute - Betriebskosten morgen.

²² Vgl. Analyse der Energieversorgung in VDI-Nachrichten 31.5.1995.

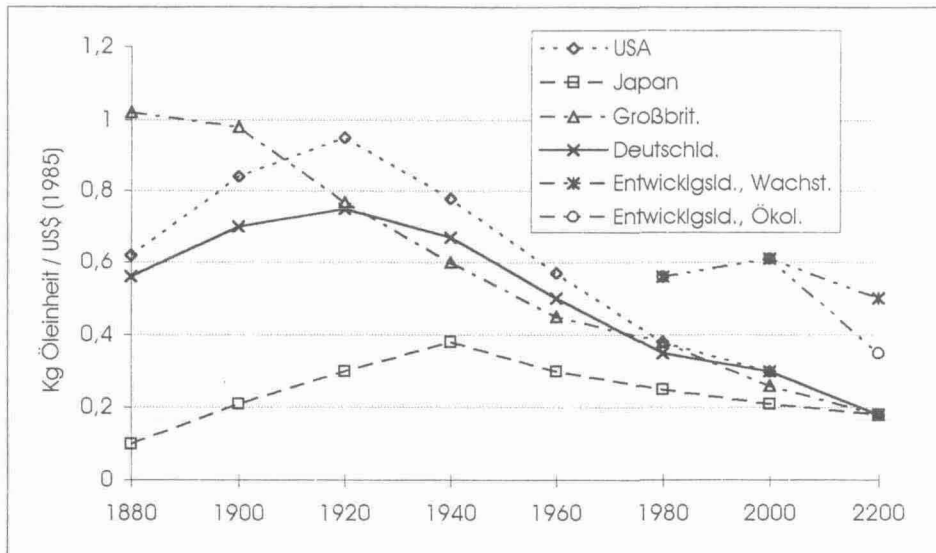


Abbildung 2.3-4

Trends der Energieintensitäten kommerzieller Primärenergie bezogen auf das Bruttosozialprodukt²³

Dies waren auch die Gründe, warum vergleichbare Entwicklungen in den meisten Entwicklungs- und Ostblockländern nicht zu beobachten waren.

Die Trends der Entwicklungsländer sind z.Z. schwer abzuschätzen. Durch das Bevölkerungswachstum und den Nachholebedarf bei der Industrialisierung erscheinen Wachstumsraten für deren Energiebedarf von 3 bis 4% pro Jahr als realistisch, was in 20 Jahren etwa eine Verdoppelung des Energiebedarfs dieser Länder und ein Wachstum von 25 bis 30% des jetzigen Primärenergiebedarfes bedeuten würde. Ein Einfrieren des status quo würde Senkungen der Industrieländer um etwa ein Drittel im gleichen Zeitraum erfordern. Ein Wachstum erscheint weniger aus der Sicht der Primärenergiebereitstellung als aus der Sicht der Umweltbelastung und der mit der CO₂-Emission verbundenen Weltklimaveränderung problematisch. Das erklärt die Vorschläge der Enquete-Kommission des Bundestages und des International Panel on Climatic Change (IPCC) sowie die politischen Bemühungen, z. B. in Verbindung mit der Weltklimakonferenz. Die von

²³ Nach G. Erdmann: Energieökonomik - Theorie und Anwendungen. Ursprüngliche Quelle: Weltenergiekonferenz (WEC-Commission), 1993.

der IPCC vorgeschlagen Halbierung der weltweiten CO₂-Emissionen bis Mitte des nächsten Jahrhunderts würde bei Eintreten der anderen Annahmen eine Senkung der CO₂-Intensität durch Energieerzeugung von etwa 2 % pro Jahr bedeuten.

Dabei stehen eine Reihe technischer Optionen wie Verbesserung der Effektivität der Energieanwendung, Einsatz kohlenstoffarmer oder -freier Brennstoffe (Erdgas, Kernenergie, Wasserstoff), Nutzung von Einkommensenergien (Wasserkraft, Windenergie, Sonnenenergie, geothermische Energie) und Förderung der Vegetation zu Verfügung. Diese Prozesse erfordern allerdings eine Kapitalbereitstellung mit einer entsprechenden Rendite, wobei energietechnische Anlagen i. a. als kapitalintensiv einzustufen sind. Neben dem unterschiedlichem Zugang zu Primärenergieträgern der Entwicklungsländer (z. B. verfügt China über beträchtliche Kohlevorkommen, deren intensive Nutzung zu einer Verschärfung der CO₂-Problematik führen würde) erscheint die Kapitalbereitstellung einer der wesentlichsten Unsicherheitsfaktoren bei einer Voraussage der Entwicklung.

Neben den ökologischen sind die ökonomischen Konsequenzen einer Klimaveränderung nicht zu vernachlässigen. So gibt es Abschätzungen, daß bei einer Verdoppelung des CO₂-Gehaltes in der Atmosphäre bis 2100 jährliche Folgekosten von 1 bis 2 % des globalen Bruttosozialproduktes wegen der Unfähigkeit der Ökosysteme diesen Veränderungen zu folgen und von 2 bis 3 % des BSP auf Grund von Naturkatastrophen (zunehmende Dürren, Überflutungen, Stürme) aufzuwenden wären, was bereits ökonomisch noch beherrschbar erscheinende Werte überschreiten würde.²⁴

2.3.2.4 Politische Dimension

Die Ware Endenergie zeichnet sich hinsichtlich der Menge (die sie bezüglich der Ökobilanz zu einer entscheidenden und hinsichtlich der ökonomischen Bilanz zu einer wesentlichen Größe macht), hinsichtlich der prinzipiellen Substituierbarkeit verschiedener Primärenergieträger und Endenergien und hinsichtlich der Forderung nach ihrer unbedingten Verfügbarkeit in den Industriegesellschaften aus. Die Bedeutung des Energiemarktes, verbunden mit der Universalität der Ware hat zur Folge, daß unterschiedlicher Interessengruppen eine Reihe von Forderungen artikulieren, hinsichtlich der Randbedingungen für den Markt, hinsichtlich der Preisbildung und Besteuerung, hinsichtlich fördernder oder behindernder gesetz-

²⁴ Vgl. „Finanzkollaps kommt vor der Ökokatastrophe“ in VDI-Nachrichten vom 24.3.1995.

licher Randbedingungen und hinsichtlich Subventionierung bzw. Forschungsförderung, deren Folgen volkswirtschaftliche Dimensionen erreichen.²⁵

Die Bedeutung der schon angesprochenen Umweltproblematik wird von allen Parteien des Bundestages akzeptiert, wobei aus den Sachverhalten teilweise konträre Schlußfolgerungen gezogen und bestimmte Strategien oder Szenarien²⁶ als Ausweg angeboten werden, ohne daß es zu einem Konsens in der Energiepolitik oder ökologisch motivierten Steuerpolitik kommen würde. Bei Politikangeboten ist die internationale Verflechtung der Industriegesellschaft und die Verflechtung der Energietechnik mit anderen Technologien zu beachten. Wegen der Vielfalt der technischen Möglichkeiten sollten Förderstrategien in allgemeine Richtungen und nicht auf ganz spezielle Techniken zielen. Spezielle Förderungen laufen Gefahr, in Marktmechanismen einzugreifen und technische Innovationsfähigkeit und Marktcompetenz zu schwächen.

Aufgrund der strategischen Bedeutung der Energiewirtschaft ist sie in den Industrieländern i. a. staatlich oder monopolisiert unter staatlicher Kontrolle organisiert. Für die netzgebundenen Energieträger (Elektroenergie, Erdgas) besteht ein natürliches Liefermonopol. Die wirtschaftlichen Randbedingungen der Energieversorgungsunternehmen in den Staaten der EU sind unterschiedlich. Die Großenergieabnehmer forderten in der Vergangenheit eine Deregulierung der Energiemärkte und eine Durchleitungspflicht für bei anderen Unternehmen gekaufte Energie. Die deutsche Regierung hat den dazu anstehenden EU-Regelungen nach anfänglichem Widerstand zugestimmt.²⁷

2.3.2.5 Ethische und juristische Dimension

Die ethische Besonderheiten der Energietechnik ergeben sich insbesondere im Zusammenhang mit der Forderung nach Umweltverträglichkeit und einem sparsamen Umgang mit Energie. Da der zivilisatorische Bedarf der Menschheit nicht naturgesetzlich determiniert ist, ergeben sich im Zusammenhang mit dem Energiekonsum und den damit verbundenen Naturbelastungen moralische und ethische Fragen.

²⁵ Vgl. RWE: Chancen und Risiken der künftigen Weltenergieversorgung, Steuern und Abgaben auf Energie.

²⁶ z. B. Die Grünen im Bundestag: Das Grüne Energiewendeszenario 2010 - Sonne, Wind und Wasser.

²⁷ Vgl. „Risse im Energiemonopol. Die europäischen Strommärkte werden liberalisiert.“ in FAZ vom 22.6.1996

Die anstehenden Fragen führen zu einer selbständigen wissenschaftlichen Bearbeitung in Form einer „Energie-Ethik“.²⁸ Die ethischen Fragestellungen konzentrieren sich auf zwei Problemkreise, auf die Frage nach der Rechtfertigung eines Bedarfes und auf die Frage nach der Zulässigkeit von Wegen der Energieversorgung, von der Ressourcengewinnung über die Nutzung einer Energietechnik bis hin zum Umgang mit anfallenden Restprodukten.²⁹

Außerdem ist die Frage zu stellen, ob bei den vorliegenden Meinungs- oder Interessengegensätzen überhaupt ein Energiekonsens zu erzielen ist, oder ob der Schwerpunkt nicht besser auf dem Finden eines sinnvollen Kompromisses liegen sollte. Die Ethik zur Lösung dieser Probleme erscheint als „Ethik des Kompromisses“.³⁰ Ein ethischer Kompromiß bedeutet nicht Einebnung der Gegensätze, sondern die „freie und plausible Durchsetzung der besseren Alternative“ als Ergebnis einer Güter- und Übelabschätzung.³¹

Hinsichtlich der Entwicklung industrieller Energiesysteme ergeben sich folgende Schwerpunkte. Eine Konsensbildung hinsichtlich der Grundfrage, einer nachhaltigen Entwicklung (sustainable development), scheint notwendig. Hinsichtlich der dabei zu lösenden Probleme müssen Kompromißfindungsmechanismen zum nationalen und internationalen Interessenausgleich installiert werden. Dabei ist zu akzeptieren, daß es ein Recht auf ausreichende Energieversorgung gibt, die Größe des notwendigen Energiebedarfes aber Ergebnis eines Kompromisses ist.

Die Umsetzung ethisch-moralischer Grundsätze und politischer Prozesse erfolgt durch den rechtlichen Rahmen für die Energietechnik. Aufgrund der volkswirtschaftlichen Bedeutung der Energiewirtschaft liegen eine Reihe rechtlicher Bedingungen vor, die sich von anderen industriellen Bereichen unterscheiden. Die Grundsätze zur Gestaltung der Energietechnik und -wirtschaft werden in Regeln zur Erzeugung und Verteilung von Energie festgelegt.³²

²⁸ Vgl. S. Feldhaus: Energie-Ethik. Zur ethischen Bewertung einer verantwortbaren Energieversorgung und zum Problem ihrer gesellschaftlichen Akzeptanz.

²⁹ Vgl. S. Feldhaus: Die Energieversorgung als ethischer Kristallisationspunkt des Konfliktes zwischen Ökonomie und Ökologie.

³⁰ Vgl. W. Schöllgen : Konkrete Ethik. Düsseldorf 1961, 85-92 und W. Korff: Kernenergie und Moralthologie.

³¹ Vgl. K. Demmer: Deuten und Handeln. Grundlagen und Grundfragen der Fundamentalmoral, Freiburg/CH-Freiburg/Br. 1985, 130.

³² Vgl. hierzu das Energiewirtschaftsgesetz (Gesetz zur Förderung der Energiewirtschaft von 1935, zuletzt geändert durch Gesetz im Dez. 1977 (BGBl. III 752-1)), das Energiesicherungsgesetz 1975 (Gesetz zur Sicherung der Energieversorgung bei Gefährdung oder Störung der Einfuhren von Erdöl, Erdölerzeugnissen oder Erdgas von Dez. 1974, zuletzt geändert durch Gesetz im Dez. 1979 (BGBl. III 754-2) und das Energieeinsparungsgesetz von Juli 1976, zuletzt geändert durch Gesetz im Juni 1980 (BGBl. III 7111-1)).

Viele Länder haben Staatsunternehmen (Frankreich) oder zentrale Energieaufsichtsbehörden (USA). In Deutschland ist die Energiewirtschaft in Energieversorgungsunternehmen oder regionalen Unternehmen (z. B. Stadtwerke) privatwirtschaftlich mit Gebietsschutz und Versorgungspflicht (Energiewirtschaftsgesetz, Konzessionsrecht) und staatlicher Überwachung der Tarifgestaltung (Tarifordnungen) gegliedert. Die vorhandenen Versorgungsmonopole sind in letzter Zeit, insbesondere im Zusammenhang mit der Entwicklung von Block-Heiz-Kraftwerken (BHKW) und den sich ergebenden Energieeinspeisungs- oder -abnahmebedingungen, Gegenstand von Kritik gewesen.

Andere Gesetze berühren die Energietechnik nicht ausschließlich, haben aber doch Konsequenzen für diese. Das betrifft insbesondere die Umweltschutzgesetzgebung mit der TA Luft und die Wärmeschutzverordnung. Hier werden verbindliche Normen vorgeschrieben, die z. T. auch außerhalb wirtschaftlicher Optimierung einzuhalten sind. Sie sollen eine Durchsetzung des fortgeschrittenen Standes der Technik stimulieren.

Für die rationelle Energieverwendung bestehen rechtliche Regeln gleichfalls in unterschiedlichen Bereichen der Gesetzgebung. Eine Reihe von ihnen sind in ihrer Ausgestaltung noch in der Diskussion. Das zeigt sich unter anderem am Beispiel der Abwärme.³³ Rechtsregeln über die Nutzung von Abwärme sind in der Bundesrepublik Deutschland sowohl im Energierecht als auch im Umweltrecht (Immissionsschutzrecht)³⁴ enthalten.

Alle bisherigen und neue anstehende Regelungen zeigen speziell für Abwärme als gemeinsames Charakteristikum, daß Abwärmenutzung und -vermeidung als Pflicht nur unter der Bedingung gefordert wird, daß sich die erforderlichen Maßnahmen in der Zeit der Nutzung einer Anlage wieder amortisieren und damit zumindest kostenneutral sind. Das betrifft auch den Entwurf einer Wärmenutzungsverordnung und den Umfang der Pflicht zu Energiesparmaßnahmen.

Bei der Vielfalt der möglichen technischen Optionen zur Senkung bzw. der Beeinflussung des Energiebedarfes erscheint eine generelle Reglementierung über Grenzwerte nicht sinnvoll. Sie erfährt zwar ihre ethische Rechtfertigung im Ziel des Schutzes von Natur und Mensch, bleibt aber im Sinne einer Kompromißfindung auch nach technischen und wirtschaftlichen Kriterien zweifelhaft. Für komplexe Technologien erscheint eine Bewertung durch Außenstehende nur mit beträchtlichem Aufwand oder nicht sachkompetent möglich.

³³ Vgl. W. Meng: Rechtliche Regeln über Abwärme in Deutschland.

³⁴ Vgl. W. D. Glatzel: Abwärme.

2.3.3 Die Energiekette von der Roh- zur Nutzenergie

In diesem Abschnitt sollen allgemeine Zusammenhänge und Grundlagen für die Ausarbeitung und Bewertung von Energiewandlungsstrategien, die von der Roh- bis zur Nutzenergie reichen, dargestellt werden. Darstellungen zu Ressourcen- und Bedarfsproblemen als Randbedingungen und Anforderungen an die Energiekette folgen in den Abschnitten 2.3.4 und 2.3.5. Die in der Gegenwart und Zukunft zur Verfügung stehenden technischen und technologischen Optionen und deren Bewertung werden im Abschnitt 2.3.6 behandelt.

2.3.3.1 Der Energie- und Exergiefluß

2.3.3.1.1 Die Energie als Rechen- und die Exergie als Bewertungsgröße

Auf die Unterschiede bei der Umwandelbarkeit der einzelnen Energieformen wurde bereits im Abschnitt zu den Grundbegriffen hingewiesen. Die Unterscheidung der Energieformen erfordert neben der Einbeziehung des Energieerhaltungssatzes als Bilanzierungsgrundlage (Erster Hauptsatz der Thermodynamik) die Einbeziehung des Entropie-Satzes (Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik). Die Entropie liefert dabei Aussagen zur Zustandswahrscheinlichkeit (Ordnungszustand) und damit zu Gleichgewichtszuständen, allgemeinen Triebkräften für Zustandsänderungen und zur prinzipiellen Umwandelbarkeit von Energieformen ineinander. Der Entropiesatz ist eine Ungleichung, die besagt, daß die Entropie bei allen natürlichen und technischen Prozessen zunimmt und nur im Gleichgewichtszustand und reversiblen Prozessen (Vergleichsprozesse, die z. B. die naturgesetzlich erreichbaren Grenzen ausweisen) konstant bleibt. Mit ihrer Hilfe kann man feststellen, ob geplante Prozesse prinzipiell möglich sind,³⁵ ebenso läßt sich nachweisen, daß ein perpetuum mobile zweiter Art³⁶ nicht möglich ist.

Die Exergie verbindet den Ersten und Zweiten Hauptsatz miteinander, berücksichtigt die unterschiedliche Umwandelbarkeit der Energieformen ineinander und rechnet sie in den Maßstab der unbegrenzt umwandelbaren Energie (mechanische Energie oder Elektroenergie) um. Die Exergiebilanz stellt eine Ungleichung dar, in der die Entropieproduktion des zweiten Hauptsatzes ihre Entsprechung als Exergieverlust durch Irreversibilitäten erfährt. Die Exergie ist gleichzeitig eine

³⁵ Sommerfeld verglich z. B. den II. Hauptsatz mit dem Direktor und den I. Hauptsatz mit dem Buchhalter in der riesigen Fabrik der Naturprozesse.

³⁶ Beim perpetuum mobile zweiter Art wird zwar der Energieerhaltungssatz eingehalten, es werden aber die Bedingungen hinsichtlich der prinzipiellen Umwandelbarkeit der Energieformen verletzt.

Zustandsgröße, die den Aufbau einer eigenständigen Methodik zur Bewertung von Energiewandlungsprozessen und zu Strategien beim Entwurf und der Gestaltung solcher Prozesse erlaubt.

Die Energien und Exergien der Stoffströme werden als Zustandsgrößen berechnet. Während die Enthalpie auf einen willkürlichen, wenn auch prinzipiell standardisierten Zustand bezogen ist, bezieht sich die Exergie auf einen für technische Systeme sehr bedeutungsvollen Zustand, den Umgebungszustand. In diesem Zustand steht Energie in praktisch unbegrenztem Maße zu Verfügung. Weil sie aber ohne zusätzliche Energiereservoirs für energetische Umwandlungen nicht nutzbar ist, wird dieser Zustand für Umwandlungen als wertlos angesehen (dead state) und dient als Bezugspunkt.³⁷ Technisch bedeutungsvolle Energien, wie z. B. unter Druck stehende Gase bei Umgebungstemperatur, werden über die Energiebilanz oft nicht adäquat abgebildet. Durch die Druckabhängigkeit der Entropie wird dahingegen ihre technische Arbeitsfähigkeit berücksichtigt.

Wärme ist nur begrenzt umwandelbar. Ihr Arbeitswert wird durch die Multiplikation mit dem Carnot-Faktor ausgedrückt. Eine rein energetische Betrachtung der Wärme führt zu den häufigsten Fehlinterpretationen bei der Bewertung energietechnischer Optionen. Mechanische und elektrische Energie sind unbegrenzt umwandelbar und Energie und Exergie stimmen überein.

In Tabelle 2.3-2 sind beispielhaft die Verhältnisse zwischen Energie und Exergie aufgeführt. Da die Exergie als minimaler Aufwand zur Bereitstellung einer Energie oder als der maximal aus ihr erzielbare energetische Nutzen interpretiert werden kann, weisen von Eins abweichende Faktoren auf mögliche Fehlinterpretationen bei einer rein energetischen Bewertung hin.

Der innere Verlust durch Entropieproduktion (als Differenz zwischen ein- und austretenden Exergien) weist auf Zusammenhänge zwischen der Energiewandlung und ihrer anlagentechnischen Realisierung hin, die in der Energiebilanz nicht sichtbar werden.

Dieses Glied ist für die Bewertung energietechnischer Optionen das interessanteste. Die Entropieproduktion ist als ein allgemeiner, für die Prozedurdurchführung unbedingt notwendiger Triebkraftabbau zu interpretieren, der dazu führt daß die Umwandelbarkeit der beteiligten Energieformen im Durchschnitt abnimmt und daß technische Prozesse, die den energetischen Zustand eines Produktes erhöhen sollen, gleichzeitig die Möglichkeit eines Entropieexportes in Form von Abwärme³⁸ oder

³⁷ Vgl. zur Exergie und Exergiebilanz, Berechnung der Exergie, Bilanzierung und Bewertung von technischen Prozessen und Systemen W. Fratzscher et al.: Exergie - Theorie und Anwendung.

³⁸ Der Exergieverlust durch Irreversibilität ist als eine Abwärme bei Umgebungstemperatur interpretierbar.

Energieart	Verhältnis von Exergie zu Energie	Energieart	Verhältnis von Exergie zu Energie
stofffreie Bilanzierung		stoffbezogene Bilanzierung	
mechanische Energie	1	Brennstoffe	e/h^{39}
elektrische Energie	1	Gase nach Kohlenverbrennung	0,95...1,05
Wärme/Kälte:	$(T_m - T_u) / T_m^{40}$	Rohstoffe	0... 1
Sanitärwärme ($\approx 50\text{ °C}$)	$\approx 0,12$	Petrochemische Produkte	$\approx 0,95$
Prozeßwärme I ($\approx 100\text{ °C}$)	$\approx 0,24$	Biomasse	$\approx 0,95$
Prozeßwärme II ($\approx 135\text{ °C}$)	$\approx 0,31$	Thermalwasser	$\approx 0,15$
Prozeßwärme III ($\approx 180\text{ °C}$)	$\approx 0,38$	Druckluft	$\rightarrow \infty$
Hochtemperaturwärme ($\approx 500\text{ °C}$)	$\approx 0,63$	Sauerstoff,	$\rightarrow \infty$
Sonnenstrahlung	$\approx 0,95$	Stickstoff, Edelgase	
Haushaltskälte ($\approx 10\text{ °C}$ unter T_u)	$\approx 0,04$		
Tiefkühlkälte ($\approx 22\text{ °C}$ unter T_u)	$\approx 0,09$		
Kryogene Kälte I ($\approx -200\text{ °C}$)	$\approx 2,88$		
Kryogene Kälte II ($\approx -250\text{ °C}$)	$\approx 11,30$		
Kryogene Kälte II ($\approx -270\text{ °C}$)	$\approx 88,89$		

Tabelle 2.3-2

Verhältnis von Exergie zu Energie für einige Energieträger.

Abprodukten benötigen. Sie wird in der Exergiebilanz unmittelbar als notwendiger energetischer Mehraufwand oder energetische Minderleistung ausgewiesen. Es wird außerdem deutlich, daß es zwei Arten von beeinflussbaren Exergieverlusten gibt, die äußeren Verluste durch ungenutzte Energieabgabe prinzipiell noch nutzbarer Energieformen und die inneren Verluste durch Triebkraftabbau im Zusammenhang mit einer gegebenen Anlagenauslegung (z.B. zur Verfügung stehende Wärmeübertragerfläche). Die Exergieverluste sind durch Wahl des Wirkprinzips, schaltungstechnische Maßnahmen und anlagentechnische Auslegung beeinflussbar.

³⁹ Die Energie (h) ist zweckmäßig nach den Festlegungen der chemischen Thermodynamik zu definieren. Für Brennstoffe ist zweckmäßig der Brennwert (entspricht etwa der Verbrennungsenthalpie nach der chemischen Thermodynamik) einzusetzen.

⁴⁰ T_m ist eine Mitteltemperatur, bei der die Wärmeübertragung erfolgt.

2.3.3.1.2 Systematik technischer Energiewandlungsprozesse und Ursachen für Wandlungsverluste

Schwerpunkt der hier aufgezeigten Systematik sollen die Ursachen von Verlusten und die Gestaltungsmöglichkeiten zu ihrer Beeinflussung sein. In Abbildung 2.3-5 ist eine Systematik aufgezeigt, aus der prinzipiell alle existierenden Energiewandlungsprozesse zusammengesetzt werden können. Die Darstellung zeigt den Energiefluß für typische Beispiele, wobei der Exergieanteil schraffiert hervorgehoben ist. Eine Verringerung des Exergieanteils in den Bilanzgrenzen wird durch innere Verluste (Irreversibilitäten durch Triebkraftabbau) hervorgerufen. Je höher der Exergieanteil an der Energie ist, um so höher ist der Energieträger qualitativ einzustufen.

Die Einteilung beruht auf einer Analogie zu Stoffwandlungsprozessen. Unter Relaxation oder Dissipation wird die einfache Umwandlung einer Energieform in eine andere verstanden. Bei der Synproportionierung wird aus einer Energieform mit hohem und einer mit niedrigem Niveau eine mit mittlerem Niveau erzeugt und bei der Disproportionierung eine von mittlerem Niveau in eine solche von hohem und niedrigem Niveau zerlegt. In Energie- und Stoffwandlungssystemen besteht das Ziel darin, diese Grundprozesse (die im technischen Fall unterschiedlich ausgeführt werden) derart zu kombinieren, daß mit minimalem Exergieinsatz bei minimaler ungenutzter Energieabgabe das geforderte Ziel erreicht wird.

Die Relaxation wird z. B. durch die im Umwandlungs- und Anwendungsbereich häufig anzutreffenden Wärmeübertragungsprozesse repräsentiert. Diese stellen die größte Quelle der Verluste und eines unnötigen energetischen Mehrverbrauches bei der Energiebereitstellung und -anwendung dar, auch wenn das in der Energiebilanz nicht sichtbar wird. Die elektrische Direktheizung zur Raumheizung oder Sanitärwasserbereitstellung ist ein extremes Beispiel für energetisch ineffektive Dissipation. Die Bereitstellung dieser Niedertemperaturwärme über Verbrennung (auch bei modernen Brennwertkesseln) ist energetisch nicht viel besser.

Andere Dissipationsprozesse bestehen darin, daß Energie eingesetzt wird, ohne daß ein energetisch ausweisbarer Nutzen vorliegt. Die Energie wird dabei im Prinzip direkt in Umgebungsenergie dissipiert. Das trifft auf alle Prozesse zu, die in der Umgebung von selbst verlaufen (z. B. Trocknung von Gütern mit nicht kapillar gebundenem Wasser) oder die energetisch nicht relevant sind (z. B. Lageänderungen bei denen Anfangs- und Endpunkt auf energetisch gleichem Niveau liegen). Der Energieeinsatz ermöglicht hierbei allerdings oft erst eine industrielle Realisierung, weil durch Triebkrafthöhen die Raum-Zeit-Ausbeute verbessert wird oder hemmende Reibungskräfte überwunden werden. In diesen Fällen wird das

Optimierungsproblem zwischen Energieeinsatz und apparativen oder anlagentechnischen Aufwendungen besonders deutlich.

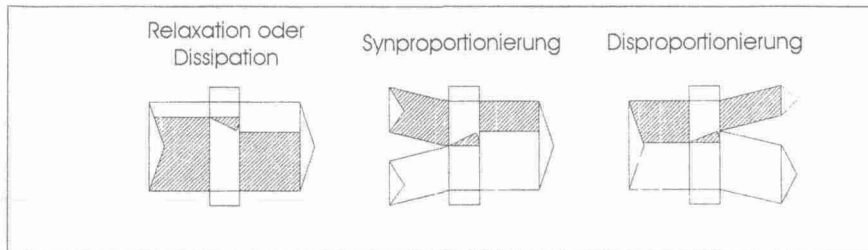


Abbildung 2.3-5

Energie-Exergie-Flußbilder von Grundprozessen zur Energiewandlung⁴¹

Eine Möglichkeit, Niedertemperaturwärme relativ verlustfrei bereitzustellen, existiert über die Synproportionierung. Bei der Wärmepumpe werden z. B. Elektroenergie und exergiefreie Umweltwärme so miteinander gemischt, daß das geforderte Niedertemperaturniveau erreicht wird. Durch die relativ komplexe Schaltung dieses Prozesses können allerdings erhöhte Verluste durch Irreversibilitäten auftreten, die die Sinnfälligkeit dieses Prozesses an Randbedingungen binden.

Ein typisches Beispiel für die Disproportionierung ist die Umwandlung thermischer Energie im Kraftwerk. Wenn es gelingt, die Abwärme verlustfrei abzugeben (bei Umgebungstemperatur oder zur weiteren Nutzung in Form der Kraft-Wärme-Kopplung), ist die Effektivität des Kraftwerks relativ hoch. Entwicklungslinien zur Senkung der inneren Verluste sind z. B. Anlagen- insbesondere Turbinenoptimierung und Nutzung höherer thermischer Niveaus durch Kopplung von Gasturbinen- und Dampfkraftprozeß.

Eine weitere Fragestellung betrifft die Prozeßgestaltung und eine Strategie zur Verbindung von Einzelprozessen zur Erzielung des technischen Gesamtziels. Aus der Sicht der Energie- und Exergiebilanz ist dabei die Realisierung des Gegenstromprinzips hervorzuheben. Beim Gegenstrom versucht man energetische Kopplungen in einer solchen Reihenfolge durchzuführen, daß qualitativ annähernd gleichwertige Energien für Wandlungsprozesse miteinander verbunden werden. Durch diese Art der Kopplung werden bestimmte Zustandskombinationen und Prozesse erst möglich. Außerdem ist der Triebkraftabbau gleichmäßiger. Bei Gleichstrom werden am Anfang Triebkräfte verschwendet, die dann nicht mehr zur Verfügung stehen.

⁴¹ Vgl. D. Hebecker: Zur Klassifikation von Kreisprozessen der Energietransformation.

Das führt dazu, daß man bei geschickter Systemgestaltung nicht nur Energie, sondern auch Investitionen sparen kann.

Für die optimale Gestaltung eines technischen Systems aus den besprochenen Bausteinen existiert kein geschlossener Algorithmus. Die Erfahrung zeigt, daß i. a. eine Reihe annähernd gleichwertiger Lösungen existiert. Die Anwendung von Algorithmen, Methoden und Strategien (auf die noch im Abschnitt 2.3.6 eingegangen wird) führt insbesondere in der stoffwandelnden Industrie zu auf die Problemstellung zugeschnittenen Lösungen. Diese Lösungen bewegen sich in die Richtung der Ressourcenschonung, des immanenten Umweltschutzes, der nachhaltigen Technologie (sustainable technology) und der wirtschaftlichen Effizienz.⁴²

2.3.3.1.3 Der Energie- und Exergiefluß der Industriegesellschaft

Die komplexen Zusammenhänge für den Energie- und Exergiefluß industrieller Systeme sind qualitativ in Abbildung 2.3-6 dargestellt. Im Flußbild ist die Unterscheidung in Energie und Exergie angedeutet. Die Schraffur hebt den Exergieanteil der Energie hervor. Dieses Netzwerk von Energie- und Exergieflüssen bildet auch die Grundlage für die Berechnung der im folgenden Abschnitt behandelten kumulierten Flüsse von den Naturressourcen bis zum Produkt. Im Bild erfolgt eine Darstellung als Fluß, auch wenn die Aufwendungen zu unterschiedlichen Zeiten anfallen, um die Zusammenhänge zwischen den Teilsystemen aufzuzeigen.

Während bei den Angaben in Energiestatistiken eine sektorale Gliederung überwiegt, wird im angegebenen Bild der Schwerpunkt auf eine funktionale Gliederung gelegt.⁴³ Im Untersystem Energieumwandlung ist die Bereitstellung von Elektroenergie und Wärme oder Kälte vorrangig. In der Stoffwirtschaft dominieren Stoffwandlungsprozesse, bei denen die Geometrie der Produkte zweitrangig ist. Der Maschinenbau ist durch Fertigungsprozesse geprägt, das heißt Formänderung, Verbindung und Montage sind die wichtigsten Prozesse. Der Bereich Konsumgüter und Dienstleistungen ist nur teilweise industriell. Die Land- und Forstwirtschaft dient der Naturbeeinflussung und -nutzung mit teilweise industriellen Methoden. Die regionalen und temporalen Kopplungen zwischen diesen Teilsystemen werden

⁴² Vgl. zum Entwurfsprozeß und zur Systemsynthese G. Gruhn et al.: Verfahrenstechnische Berechnungsmethoden, Teil 6 Verfahren und Anlagen, zur Energiewandlungs- und Stoffwandlungsstrategie W. Fratzscher, K. Michalek: Einige Überlegungen zur systematischen Gestaltung der rationellen Energieanwendung, zur Methodik bei Wärmeübertragungssystemen und anderen Systemen der Energie- und Stoffwandlung B. Linnhoff: Pinch analysis - a state-of-the-art overview.

⁴³ Vgl. G. Erdmann: Energieökonomik - Theorie und Anwendungen.

durch spezielle Koppel-, Transport- und Speichersysteme realisiert, die zur Realisierung dieser Aufgabe einen eigenen Energie- und Exergiebedarf aufweisen.

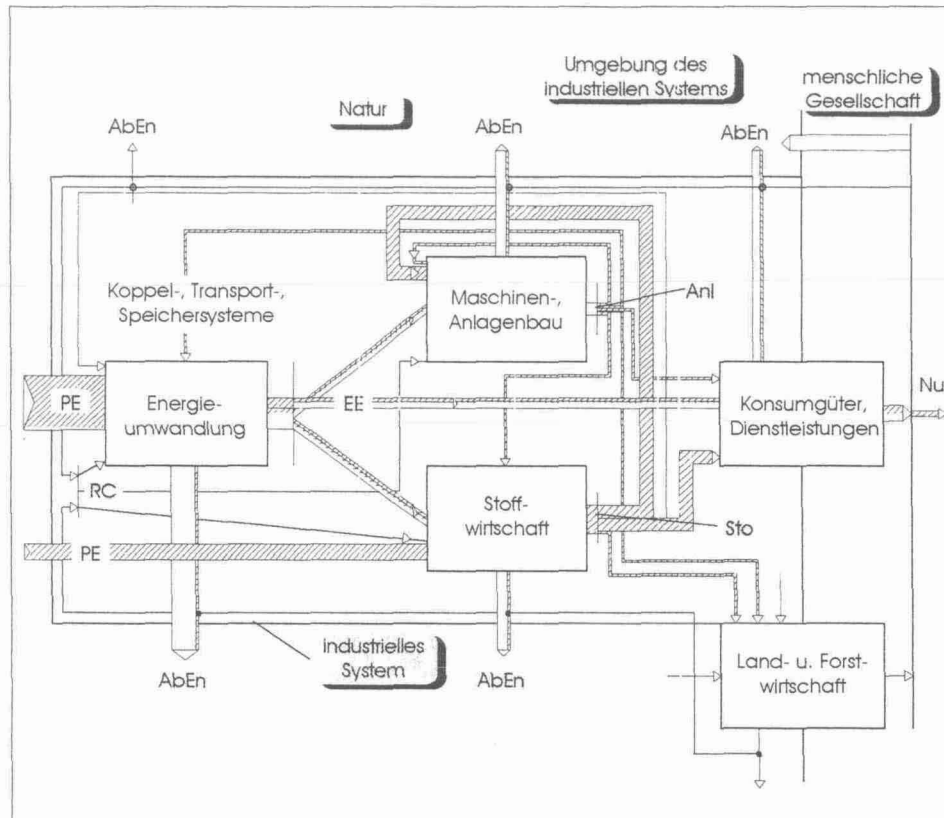


Abbildung 2.3-6

Der Energie- und Exergiefluß industrieller Systeme in Wechselwirkung mit Natur und menschlicher Gesellschaft.

PE - Primärenergetischer Aufwand: Primärenergie-Vermögen, Primärenergie-Einkommen, Rohstoffe. EE - Endenergie: Elektroenergie, Wärme und stoffliche Energieträger. Sto - Stoffe. Anl - Anlagen, Maschinen, Bauwerke und Ausrüstungen, AbEn - Abfallenergie: Abwärme, Abprodukte, Abfälle. RC - Recycling. Nu - Nutzen. Pfeile - Energie, schraffiert - Exergie.

Die Umgebung des industriellen Systems sind Natur, menschliche Gesellschaft und andere nichtindustrielle Systeme. Die Natur liefert dabei die energetischen und stofflichen Ressourcen zum Betreiben der Systeme und nimmt deren Abprodukte und Abenergien wieder auf. Die menschliche Gesellschaft gibt das Ziel der aufgezeigten Prozesse vor und ist ihr Nutznießer.

Die Gesamtbilanz ist für den stationären Fall dadurch gekennzeichnet, daß letztendlich alle aufgenommene Energie und die der Natur entnommenen Stoffe wieder in umgewandelter Form in die Natur abgegeben werden. Damit kann man aus thermodynamischer Sicht formulieren, daß das Ziel der menschliche Gesellschaft nicht Energieverbrauch sondern das Aufrechterhalten eines Ordnungszustandes ist, der sich von dem natürlichen unterscheidet. Die Bedeutung des zweiten Hauptsatzes, der hier durch die Exergie widergespiegelt wird, wird noch deutlicher, wenn schärfer formuliert wird, daß damit nicht Energieverbrauch sondern Entropieexport das Ziel des industriellen Systems ist.⁴⁴

Die Klassifikation der zu- und abgeführten Ströme und auch der im System wechselwirkenden Ströme ergibt sich aus technologischen und thermodynamischen Überlegungen. Sie soll eine Bewertung von Flüssen des kumulierten Energieaufwandes für Produkte oder Dienstleistungen erleichtern. Die Energiezufuhr wird in Primärenergie-Vermögen, Primärenergie-Einkommen und Rohstoffe unterteilt.⁴⁵ Jede der aufgeführten Arten der Energiezufuhr stammt aus Ungleichgewichten in der Umgebung, was gleichzeitig bedeutet, daß eine wechselwirkungsfreie Energieentnahme unmöglich ist. Die Konsequenzen sind allerdings z. B. aufgrund unterschiedlicher Energiedichten und Nutzungseigenschaften unterschiedlich.

Die energetische Bewertung der Rohstoffe ist für das Gesamtsystem quantitativ nicht entscheidend, hat aber teilweise gravierende Auswirkungen auf die Bewertung von Technologien der Stoffwirtschaft. Diese Auswirkungen setzen sich über die Wechselwirkung mit dem Maschinen- und Anlagenbau und über die Bewertung der eingesetzten Maschinen, Anlagen, Ausrüstungen und Bauten in alle Bereiche des industriellen Systems fort.

Rückführungen und Kreisläufe sind im System quantitativ bedeutsamer als der eigentliche Nutzeffekt für die Menschen. Das macht Probleme für eine dekomponierte Betrachtung (durch Aufschneiden von Kreisläufen und Ansetzen summarischer Gut- oder Lastschriften) sichtbar. Das betrifft insbesondere die Bewertung einer Recycling-Wirtschaft.

⁴⁴ Vgl. W. Fratzscher: Zur thermodynamischen Bewertung alternativer Energieträger.

⁴⁵ S. o. im Abschnitt „Definitionen und Grundbegriffe“

2.3.3.2 *Der kumulierte Fluß*

Für Energiewandlungstechnologien sind verschiedene Bewertungs- und Optimierungsprobleme zu lösen. Vergleicht man den Anlagenaufwand zur Senkung der Verluste und den Aufwand für die Verluste, so müssen beide im gleichen Maß gemessen werden. Neben der monetären Bewertung besteht die Möglichkeit alle energetischen Aufwendungen für die Anlage zu kumulieren und dem möglichen Spareffekt entgegenzustellen. Gleichfalls lassen sich verschiedene Energie-, Stoffwandlungs- und Recyclingtechnologien über den gesamten Lebenszyklus (Herstellung, Nutzung und Entsorgung, Life-Cycle-Bewertung) für alle relevanten Komponenten⁴⁶ miteinander vergleichen. Die Kumulierung erfolgt i. a. von den Primärenergien bis zur Bereitstellung der Nutzenergie oder Dienstleistung. Der Ausweis des kumulierten Energie- oder Exergieaufwandes ist besonders angezeigt, wenn bei Innovationen verlässliche monetäre Bewertungen noch nicht zur Verfügung stehen oder ein Versagen des monetären Bewertungssystems aufgrund von Besonderheiten des internationalen Marktes erwartet wird.

In einer Energiewandlungskette pflanzen sich die Wirkungen von Energie- bzw. Exergieverlusten fort. Das heißt die Energie wird spezifisch immer wertvoller. Bei einer Optimierung von Teilen technologischer Systeme muß der Sachverhalt, daß Exergie an verschiedenen Stellen des Gesamtsystems ungleichwertig ist, berücksichtigt werden, was durch den kumulierten Exergieaufwand möglich ist.

Damit ergeben sich zwei Hauptanwendungsrichtungen für den kumulierten Energie- oder Exergieaufwand:

1. Die vergleichende Bewertung von Stoff- und Energiewandlungstechnologien mit allen energetischen Wechselwirkungen zur Umwelt, und
2. Die Bewertung von Energie- und Stoffströmen in Verbindung mit Teilsystemen komplexer Energie- und Stoffwandlungssysteme mit der Zielstellung, eine strategische Zielfunktion für die Gestaltung, die Optimierung und den Betrieb dekomponierter Teilsysteme zu liefern.

Da die Energie der meisten Primärenergien etwa der Exergie entspricht, besteht oft kein wesentlicher Unterschied im Zahlenwert des kumulierten Energie- oder Exergieaufwandes. Die Hauptvorteile bei der Anwendung der exergetischen Methode bestehen darin, daß

⁴⁶ S. a. VDI-Richtlinie: Kumulierter Energieaufwand - Begriffe, Definitionen, Berechnungsmethoden und W. Mauch: Methodik zur ganzheitlichen energetischen Bewertung.

- zwanglos in die Betrachtung auch Rohstoffe einbezogen werden können, die nicht als Primärenergieträger betrachtet werden,
- die Verluste und damit Ursachen für das Anwachsen des kumulierten Energieaufwandes in der Energiewandlungskette genau lokalisiert werden können,
- Aufteilungsprobleme bei Koppelproduktion besser lösbar sind sowie
- sich dimensionslose Verhältnisse für die Energiewandlungskette bilden lassen, die für eine allgemeine Gütebewertung geeignet sind (da qualitativ gleichwertige Energie, nämlich Exergie, verglichen wird).

Die der Berechnung des kumulierten Energieaufwandes zugrunde liegende Energiekette ist eine Vereinfachung für das industrielle System, indem Netze und Rückführungen geschnitten und die Schnittstellen mit Werten belegt werden. Die Werte werden oft über Input-Output-Analysen bestimmt. Dabei bestehen die Nachteile der Anwendung der Input-Output-Tabellen im wesentlichen darin, daß Proportionalität der Outputs bei Koppelproduktion für den Sektor bzw. Bereich vorausgesetzt ist und die sektorale und funktionale Zuordnung der Datenbasis oft für technologische Untersuchungen zu ungenau ist.

Für die Bilanzierung des kumulierten Energieaufwandes gilt ein Erhaltungssatz, weil alle Aufwendungen, auch für die Verluste, auf die Nutzströme aufgeteilt werden müssen. In sehr vielen Fällen sind Aufteilungsprobleme zu lösen, da eine Aussage erforderlich ist, welcher Teil des Aufwandes für welches Produkt eingesetzt wird. Dieses Problem ist charakteristisch für die Koppelproduktion von Produktionssystemen. Unter Benutzung der Exergie läßt sich ein einfacher Aufteilungsmodus vorschlagen, da auf jeden Fall der reversible - minimal notwendige - Anteil durch die Exergie ausgewiesen wird. Mit dem direkten Aufwand für den Prozeß werden gleichzeitig die in ihm kumulierten Aufwendungen vorgelagerter Prozesse zugewiesen. Die in Abbildung 2.3-7 dargestellten prinzipiellen Zusammenhänge lassen sich über Fließschemasimulationsprogramme auch für relativ komplexe Systeme abbilden.⁴⁷

Das Beispiel veranschaulicht die bei der Vereinfachung von Netzen und dem Aufschneiden von Rückführungen zu erwartenden Probleme. So finden sich z. B. alle drei primären Energiearten im Ausgangsstrom 4 des Elementes I, obwohl dieses nur durch einen primären Energiestrom gespeist wird. Die Aufteilungsverhältnisse im am Ende liegende Element III beeinflussen über die Rückführung ganz entscheidend die Bewertung des Elementes I. Das aufgezeigte Problem ist für viele Abprodukt-

⁴⁷ S. a. zur Anwendung auf komplexe Stoffwandlungssysteme und zur Modellierungsstrategie K. Michalek et al.: Berechnung des kumulierten Energieaufwandes für Produkte der stoffwandelnden Industrie und K. Michalek: Berechnung des kumulierten Energieaufwandes.

und Abwärmeverwertungen und Recyclingaufgaben signifikant und nicht allgemeingültig gelöst.

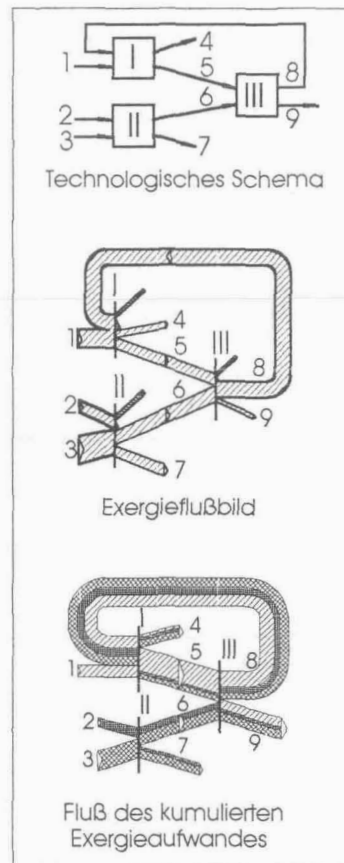


Abbildung 2.3-7

Flußbilder in Energiewandlungsnetzen

Die Unterscheidung von Energiearten im Aufwand macht eine Kopplung zu Öko- und Kostenbilanzen relativ einfach möglich. Beim Vergleich von Energiewandlungsstrategien ist eine Differenzierung der Energiearten nach Primärenergien und Rohstoffen zweckmäßig. Für die Optimierung von Technologien ist eine solche Unterteilung, die auch Zwischenprodukte enthalten kann, an der Bilanzgrenze der

Technologie vorteilhaft. Damit wird eine Fortrechnung, im Prinzip durch Wichtungsfaktoren, bis zur natürlichen Umgebung ermöglicht. Eine Unterscheidung in die Aufwandsarten für Ausrüstungen und Anlagen und Prozeßbedarf erlaubt eine allgemeine Behandlung des schon angesprochenen Optimierungsproblems.⁴⁸

Bei der Verwendung der exergetischen Methode ergeben sich je nach Bilanzgrenze Teilsystemwirkungsgrade und Wirkungsgrade zur Herstellung der Produkte bzw. als Kehrwert spezifische kumulierte Aufwendungen. Der nur bei reversibler Prozeßführung erreichbare Grenzwert ist Eins. Der Unterschied der kumulierten exergetischen Bewertung im Vergleich zur exergetischen Bewertung eines Prozesses besteht in der Ausweitung des Bilanzkreises.

Der Ausweis energetischer Amortisationszeiten und Erntefaktoren im Zusammenhang mit dem kumulierten Energieaufwand dient einer Veranschaulichung von Bilanzverhältnissen durch ökonomischen bzw. Wachstumsvergleich.⁴⁹ Die Werte haben für die Nutzung von Einkommensenergien, wie Wind- oder Sonnenenergie, eine besondere Bedeutung, werden aber auch für andere Energiewandlungsanlagen ausgewiesen. Die energetische Amortisationszeit gibt den Zeitpunkt an, zu dem die Anlage soviel fossile Energie durch Nutzenergie substituiert hat, wie dem ihr zugeordneten kumulierten Energieaufwand entspricht. Die zugeführten umgewandelten Energien werden nicht bilanziert. Nur wenn diese Zeit geringer als die Lebensdauer der Anlage ist, kann die Anlage als Energieerzeugungsanlage gelten. Ein Vergleich verschiedener Anlagen über die energetische Amortisationszeit ist nur bei gleicher Lebensdauer sinnvoll. Bei unterschiedlichen Lebensdauern der Anlage muß für die gleiche Aussage der Erntefaktor herangezogen werden, der die in der Lebensdauer durch Nutzenergie substituierte fossile Energie zum kumulierten Energieaufwand für die Anlage ins Verhältnis setzt. Das Verhältnis muß größer als Eins sein

Quantitative Folgerungen zum kumulierten Energie- und Exergieaufwand werden im Zusammenhang mit den Möglichkeiten optionaler Energiewandlungstechnologien im Abschnitt 2.3.6 gezogen.⁵⁰

⁴⁸ Vgl. Ausführungen zur Thermoökonomie in W. Fratzscher et al.: Exergie - Theorie und Anwendung und Einzeldarstellungen in Proceedings of the Workshop „Second Law Analysis of Energy Systems - Towards the 21-st Century“.

⁴⁹ Vgl. H.-J. Wagner: Energieketten von A - Z - Erntefaktor und energetische Amortisationszeit.

⁵⁰ Bewertende Daten zur Erzeugung von Elektroenergie und Wärme (Anlagenaufwand, Gesamtaufwand, Technologische Optimierung, Energiespeicherung), zur Erzeugung chemischer Produkte, zur Produktion von Kraftfahrzeugen, zur Wohnraumheizung und eine tabellarische Zusammenstellung für Energieträger, Rohstoffe und Halbfertigfabrikate finden sich auch in W. Fratzscher, K. Michalek: Aussagekraft von Bilanzen der kumulierten Energie- und Exergieaufwendungen und W. Fratzscher, K. Stephan, K. Michalek: Energietechnik. In Bericht der Arbeitsgruppe „Optionen ...“ 1996.

2.3.3.3 Die Bewertung der Energiekette

Im Zusammenhang mit der Bewertung und vor allem dem Vergleich von Energiewandlungstechnologien wird zunehmend auf die Notwendigkeit einer ganzheitlichen Bewertung, der Prozeßkettenanalyse, hingewiesen. Der alleinige Vergleich von als wesentlich erachteten Teilsystemen kann zu falschen Schlußfolgerungen führen.⁵¹

Diese umfassende und gleichzeitig mehrdimensionale Bewertung ist Gegenstand der Technikfolgenabschätzung. Dabei sieht sie auch das Finden der Bewertungsmaßstäbe als ihre Aufgabe an. Zu den Aufgaben der Technikfolgenabschätzung gehören die Erforschung der Genese und Entwicklung von Technologien, die Erforschung der sozialen und ökonomischen Kontextbedingungen, die Abschätzung der zu erwartenden Folgen für Gesellschaft, Wirtschaft und Umwelt, die Erforschung technologischer Modifikationen, die negative Folgen mildern oder verhindern, die Gestaltung gesellschaftlicher Diskurse, die Bewertung und Ableitung von Handlungsempfehlungen.⁵²

Andere Aspekte und auch Teilaspekte der Technikfolgenabschätzung sind in den folgenden Bewertungen zu sehen:

Die bereits angeführte exergetische oder kumuliert exergetische Methodik stellt sich als naturgesetzliche, technische Bewertungskomponente der Energiewandlungskette dar. Mit der energetischen Methodik ist ein Vergleich nur mit Einschränkungen möglich. Die angeführten Methoden sind besonders für Innovationsstrategien hilfreich. Für die industrielle Entwicklung ist letztendlich die wirtschaftliche Bewertung entscheidend.

Bei der wirtschaftlichen Bewertung können Energieträger- und Rohstoffsubstitutionen, alternative Technologien, Kapital- und Arbeitskräfteeinsatz im monetären Maßstab gegeneinander aufgewogen werden. Selbst bei einer Beschränkung auf die betriebswirtschaftliche Ebene bleiben allerdings wirtschaftliche Imponderabilien, wie Zukunftserwartungen, Innovationspotential, Sicherheits- und Zuverlässigkeitsprobleme,⁵³ so daß die Investitionsentscheidung ein subjektiver Prozeß bleibt.

Für Entscheidungsträger in der Politik, Wirtschaft und Wissenschaft ist oft eine ganzheitliche volkswirtschaftliche Bewertung von Interesse. Die Differenzen zwischen den volkswirtschaftlichen und den betriebswirtschaftlichen Kosten werden

⁵¹ Vgl. A. Wiese: Ganzheitliche Bilanzen von Energiewandlungsketten und Energiesystemen.

⁵² Vgl. O. Renn: Technikfolgenabschätzung von Energiesystemen und VDI-Richtlinie: Technikbewertung, Begriffe und Grundlagen.

⁵³ Vgl. z. B. zu weiterführenden Analysen zur Absicherung von Investitionsentscheidungen und Verfahren mit betriebsübergreifender Zielsetzung in D. Winje, D. Witt: Energiewirtschaft.

dabei als externe Kosten bezeichnet. Ihre Ermittlung und Zuweisung zu den einzelnen Technologien erweist sich als sehr schwierig, weil die komplexen Wirkungsmechanismen nur teilweise aufgeklärt oder einer monetären Bewertung kaum zugänglich sind.⁵⁴ Außerdem besteht die Notwendigkeit, alle Vergleichsobjekte unter gleichen Randbedingungen zu bewerten, und eine erhebliche Datenunsicherheit.

Die externen Kosten der Energieversorgung fallen vor allem im Umwelt-, Klima- und Gesundheitsbereich an. Sie betreffen außerdem Folgen für die zukünftige Ressourcenverteilung bei heutiger Ressourcennutzung und Randbedingungen, die mit makroökonomischen Indikatoren und öffentlichen Dienstleistungen und Finanzierungen verbunden sind. So betragen z. B. die emissionsbedingten Schäden in der BRD pro Jahr bei Maschinen, Anlagen und Bauten ca. 10 Mrd. DM, für den Wald ca. 0,5 bis 9 Mrd. DM (je nach Folgenabschätzung) und für gesundheitsbedingte Arbeitsausfälle ca. 1,5 Mrd. DM. Die Folgen einer Weltklimaänderung können z. Z. noch nicht zuverlässig abgeschätzt werden. Die Folgen vielfältiger direkter und indirekter Subventionen und unterschiedlicher Besteuerungen von der Forschung und Entwicklung bis zur Produktion führen gleichfalls zu Abweichungen zwischen betriebswirtschaftlicher und volkswirtschaftlicher Bewertung.⁵⁵

Für den Ausweis der externen Kosten einer Energiekette oder der ganzheitlichen Bewertung ihrer Auswirkungen auf die Umwelt spielen Ökobilanzen als Zwischenschritt zum Ausweis der Ursache-Wirkungsbeziehungen zwischen angewandtem Prozeßschritt, Ressourcenverbrauch und Emissionen eine wesentliche Rolle.⁵⁶ Die Bewertung der Ergebnisse kann auch durch nichtmonetäre Indikatoren, wie Toxizität, relativer Treibhauseffekt u. ä., erfolgen.

2.3.3.4 Der Weg zur nachhaltigen Energietechnologie

Seit den ersten Berichten des Club of Rome⁵⁷ über den Bericht an den Präsidenten der USA⁵⁸, die Untersuchungen des Worldwatch Institutes⁵⁹ bis zu dem politischen Ringen um international verbindliche Emissionsfestlegungen im Rahmen der

⁵⁴ Vgl. O. Hohmeyer: Soziale Kosten des Energieverbrauchs, A. Voß et al.: Externe Kosten der Stromerzeugung und prognos: Identifizierung und Internalisierung der externen Kosten der Energieversorgung.

⁵⁵ Vgl. M. Weisheimer: Zur Bewertung energetischer Systeme unter Einschluß externer Kosten.

⁵⁶ Vgl. R. Frischknecht et al.: Ökoinventare für Energiesysteme.

⁵⁷ D.L. und D. Meadows et al.: Die Grenzen des Wachstums.

⁵⁸ Global 2000 - Der Bericht an den Präsidenten der USA.

⁵⁹ Worldwatch Institute Report: Zur Lage der Welt - Daten für das Überleben unseres Planeten.

Weltklimakonferenz⁶⁰ steht das Ringen um eine nachhaltige Entwicklung⁶¹ und damit auch nachhaltiger industrieller Technologien (sustainable technologies) im Blickpunkt der öffentlichen Diskussion. Dabei kommt der Energietechnik wegen der gravierenden Wirkung ihrer Systeme besonderes Gewicht zu. Die Kernaussage lautet, daß eine Extrapolation der zur Zeit vorhandenen Trends zu einer globalen Katastrophe für die Menschheit schon in einigen Jahrzehnten führen würde.

Der Grundtenor der zur Problemlösung publizierten Szenarien besteht darin, daß mit den heute bekannten technischen Maßnahmen der negative Trend zu stoppen ist, wobei verschiedenen Pfade (z. B. Innovation durch technischen Fortschritt, gezielte volkswirtschaftliche Eingriffe, Energie-Askese) zum Ziel führen, allerdings bei teilweise extrem unterschiedlichen Aufwendungen und Wohlstand. Die Forderung das Doppelte des Weltwohlstandes mit der Hälfte der Aufwendungen zu erreichen, erscheint aus technischer Sicht durchaus machbar und gleichzeitig als Herausforderung an die Industriegesellschaft und der sich in diese Richtung entwickelnden Länder.⁶² Der internationale politische und wirtschaftliche Handlungsbedarf wird trotz mehrjähriger Diskussion aus den bis heute nach wie vor negativen Welttrends bezüglich Energieverbrauch und Emission sichtbar. Auch die erreichten Emissionsminderungen in der BRD sind der Kritik ausgesetzt, weil sie in beträchtlichem Maße auf die Krise des industriellen Systems in Ostdeutschland und Produktionsverlagerungen bzw. Änderungen in der industriellen Struktur und weniger auf die Verbesserung der Energie- und Stoffwandlung zurückzuführen sind. Die bisherigen Ausführungen belegen, daß schon aus naturgesetzlicher Sicht die Menschheit das Gleichgewicht in der Natur verschiebt, gleichgültig welche Technologien angewandt werden. Für die Aufrechterhaltung ihres biologischen und kulturell-sozialen Ordnungszustandes braucht die Menschheit den Import von Ordnungszustand aus der Umgebung und den Export von Unordnung (Entropie) in die Umgebung. Das zu optimierende Glied in diesem Prozeß sind die unnötigen Entropieverluste im industriellen System und bei der Energieanwendung bzw. bei dem Verbrauch von Produkten und Dienstleistungen durch den Menschen. Eine nachhaltige Entwicklung erfordert also den Übergang von einer Energie- zu einer Entropiewirtschaft.

Das notwendigerweise vorhandene thermodynamische Ungleichgewicht zwischen dem Menschen und der natürlichen Umgebung ist nicht ungewöhnlich. Es ist Grundlage der in der Natur vorhandenen Bewegungen, Ressourcen und bio-

⁶⁰ FAZ 19.7.96: „Die Weltklimakonferenz einigt sich in Genf bis zur Nachfolgekonferenz in 18 Monaten in Tokyo Grenzwerte für CO₂-Emissionen auszuhandeln.“

⁶¹ Vgl. P. Knauer: Anmerkungen zum Konzept der nachhaltigen Entwicklung.

⁶² VDI-Nachrichten 16.6.95: Bericht des Club of Rome mit dem Arbeitstitel Faktor 4. 50 Beispiele, die zeigen sollen, daß es möglich ist den doppelten Wohlstand auf der Erde mit der Hälfte der gegenwärtig verbrauchten Energie zu erzeugen.

logischen Objekte. Der heutige Zustand in der Atmosphäre ist z. B. das Ergebnis der Entwicklung eines dynamischen Gleichgewichtes zwischen Flora und Fauna. Allerdings hat sich mit dem Wachstum der Menschheit und der Industrialisierung eine derartig starke Rückwirkung auf die Natursysteme ergeben, daß nicht nur die Existenz dieser Systeme im heutigen Zustand, sondern auch die der Menschheit bedroht ist.

Da Konsumverzicht im kulturell-sozialen Umfeld einer Industriegesellschaft kaum durchsetzbar scheint, bieten sich als Hauptrichtungen der technischen Entwicklung an, die Änderung der Struktur des Konsumverhaltens (z. B. Änderung der Organisation von Kommunikation, Transport und Arbeit), Verringerung der Umwandlungs- und Anwendungsverluste und bewußte Gestaltung der Umwelt. Dabei ist die Senkung der Verluste vorrangig durch die Verbesserung industrieller Energie- und Stoffwandlungsprozesse und die industrielle Bereitstellung energiesparender Konsumgüter und Produkte des Bauwesens zu erreichen. Die gezielte Umweltbeeinflussung erscheint als vorwiegende Aufgabe von Land- und Forstwirtschaft unter industrieller Beteiligung. Die sich für die Energietechnik ergebenden Optionen werden in den nächsten Abschnitten behandelt. Die Organisation und Verwirklichung dieser Aufgaben und damit auch die Beschaffung von Arbeitsplätzen ist allerdings wesentlich von den gesellschaftlichen, wirtschaftlichen und finanziellen Rahmenbedingungen abhängig.

Bei der Diskussion der Energie- und Exergieflußbilder von industriellen Prozessen wurde auf die Einheit von Stoff- und Energiewandlung und Strategien zur Prozeßgestaltung hingewiesen. Dies führt zu technologieimmanentem Umweltschutz. Sekundärer Umweltschutz wird als „end of pipe“ Technologie an die bestehende Technologie angefügt und spielt besonders bei der Modernisierung bestehender Technologien eine Rolle. Er ist meist nicht so effektiv, weil zusätzliche Wandlungsstufen erforderlich sind, dient aber der Erhaltung des in den alten Anlagen kumulierten Energieaufwandes.

Mit Maßnahmen zur Entlastung der Umwelt und Erhöhung der energie- und stoffwirtschaftlichen Effektivität sind oft Rückführungen verbunden, die im volkswirtschaftlichen, technologieübergreifendem Rahmen auch als Abfallrecycling auftreten. Die Maßnahmen sind mit Trenn- und Mischungsprozessen verbunden, die selbst energetische Konsequenzen haben. Es sollte gewährleistet werden, daß die Qualitäten der zurückgewonnenen Ströme keine unnötigen, zusätzlichen Umwandlungsstufen erfordern. Dies hat z. B. für die Wahl zwischen Stoff- und Energierecycling von Abfällen und Abprodukten Konsequenzen. Sortierte und getrennte Erfassung erleichtert oft ein Stoffrecycling und damit Aufrechterhaltung des im Stoff kumulierten Energieaufwandes, während bei gemischter Erfassung der Trennaufwand so hoch sein kann, daß energetische Verwertung zu bevorzugen ist.

Beachtet man noch den erhöhten Aufwand für eine getrennte Rückführung von Fraktionen, ergibt sich eine zu optimierende technologische Vielfalt. Die Lösung ist von den konkreten Randbedingungen abhängig aber auch technologisch beeinflussbar (z. B. durch Standardisierung von Verpackungen).

Eine andere Variante ausschließende Alternativentscheidung zwischen der Nutzung regenerativer Energien (Einkommensenergie), Kernenergie und fossilen Brennstoffen ist aus der Sicht der Exergiebilanz nicht gerechtfertigt, weil alle Varianten aus thermodynamischen Gründen mit Rückwirkungen auf die Umwelt verbunden sind. Aus heutiger Sicht scheint das Problem der prinzipiellen Ressourcenverfügbarkeit nicht entscheidend zu sein, wobei zumindest durch den nicht planbaren Anfall der regenerativen Energien zusätzliche Prozesse und Anlagen mit entsprechenden Verlusten notwendig sind und die geringen Energiedichten hohe in den Anlagen kumulierte Aufwendungen erfordern. Andererseits stellen die hohen Energiedichten konventioneller industrieller Anlagen ein erhöhtes Gefährdungs- und lokales Umweltbelastungspotential dar. Moderne Technologien erlauben allerdings auch für relativ dezentralisierte Versorgungssysteme ein wirtschaftliches Arbeiten. Aufgrund der außerdem zu beachtenden anderen Bewertungsgesichtspunkte (Sicherheit, Toxizität, Treibhauseffekt, Wirtschaftlichkeit) und der Abhängigkeit der optimalen Lösung von der natürlichen, industriellen und gesellschaftlichen Umgebung des Systems ist für die nächsten Jahrzehnte eher ein relativ breiter internationaler Technologiemix als die Durchsetzung einer Standardtechnologie zu erwarten.

Mit der Forderung nach Nachhaltigkeit und der Untersuchung der dafür geltenden Bedingungen wird die Komplexität moderner industrieller Systeme deutlich. Einseitige Bevorzugungen oder Benachteiligungen verschiedener Energieträger, Stoffe oder Technologien sind in ihren Konsequenzen kaum abzuschätzen. Sie erfordern außerdem gesellschaftlichen und politischen Konsens in der Bewertung, während das Wirken der Marktkräfte unter Randbedingungen, die nur grundsätzliche technologische Ziele fördern, ohne einzelne Technologien zu evaluieren, i. a. leichter durchsetzbar ist und der nicht zu übersehenden technologischen Vielfalt wesentlich besser gerecht wird. Steuern, Abgaben oder Grenzwerte sind durchaus zu befürworten, wenn sie in einem internationalen Kontext stehen und keinen volkswirtschaftlich ungerechtfertigten Eingriff in die Belange einzelner Interessengruppen darstellen. Ungerechtfertigte Eingriffe können zu marktwirtschaftlicher Uneffektivität, Schädigung des Kapitalstocks und damit der Reaktionsmöglichkeiten auf veränderte Anforderungen in der Zukunft führen.⁶³

⁶³ Vgl. zu Marktmechanismen, neuen Energieversorgungskonzepten und Subventionen oder Ordnungspolitik G. Erdmann: *Energieökonomik - Theorie und Anwendungen*.

Zu den wesentlichen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen, die die Entwicklung nachhaltiger Technologien beeinflussen, gehören (das folgt aus den oben angesprochenen Bewertungs- und Optimierungsproblemen) die Verfügbarkeit von Kapital und dessen Bewertung, Devisenparitäten wegen der Internationalität wenigstens eines Teiles der Kopplungen, Rahmenbedingungen für das Verhältnis der einmaligen zu den laufenden Aufwendungen, Rahmenbedingungen für das Verhältnis zwischen Kapitalaufwendungen und Aufwendungen für die menschliche Arbeitskraft und die internationale Vermarktungsfähigkeit der Produkte.

Dabei ist weniger der absolute Wert als die Relation der Größen zueinander entscheidend. Aus deutscher Sicht würden in Diskussion befindliche Richtungen wie z. B. eine Abwertung der DM, eine Verbilligung von Kapital, möglicherweise eine Verbilligung menschlicher Arbeit (hier sind die Wirkungsmechanismen besonders komplex) nicht nur ein industrielles Wachstum bewirken, sondern die Optima auch in eine Richtung verschieben, so daß technische Innovation von selbst auch eine Umweltentlastung bewirkt.⁶⁴

2.3.4 Primärenergien

In der Energiediskussion spielt die Nutzung verschiedener Primärenergieoptionen eine große Rolle. Mit der Wahl dieser Optionen am Anfang der Energiewandlungskette ergeben sich Konsequenzen für die Ressourcennutzung, die Belastung der Umwelt und die zu entwickelnden Energiesysteme.

2.3.4.1 Primärenergieressourcen und -nutzung der Welt und der BRD

Zur Beurteilung von Primärenergieressourcen und -reserven spielt die Einteilung der ausgewiesenen Vorräte eine Rolle. Diese erfolgt nach der Zuverlässigkeit der Kenntnisse über die Vorräte und den Kosten ihrer Gewinnung. Der bekannte und wirtschaftlich gewinnbare Anteil der Ressourcen wird als Reserven bezeichnet. Die

⁶⁴ VDI-Nachrichten 23.6.95: Peter Henicke (Wuppertal Institut für Klima, Energie und Umwelt) kommt mit etwas anderen Voraussetzungen zu ähnlichen Aussagen: Beim heutigen Stand der Technik sind 50% des Energiebedarfes einsparbar. Mit Hemmnisabbau, Energiesteuern, Förderprogrammen, modernem Energiespargesetz u.a. sind 110 Mrd. DM volkswirtschaftlicher Energiekosten in BRD sparbar (Erschließung der technischen Einsparpotentiale in 15 bis 20 Jahren). Szenarien der Klima-Enquete-Kommission des Bundestages: Trendwende kostet nur zwischen 25 und 130 DM pro Jahr und Verbraucher.

Gesamtressourcen enthalten außerdem noch spekulative, hypothetische und unwirtschaftliche Anteile.

Primärenergie ⁶⁵	Anteil am Verbrauch ⁶⁶	Anteil an Ressourcen ⁶⁷	Ressourcen pro Q	Reserven pro Q	Reichweite in a
Erdöl	0,38	0,035	34	15	40
Ölsande, -schiefer		0,146	143	16	
Erdgas	0,22	0,038	37	12	56
Steinkohle	0,15	0,657	645	42	280
Braunkohle	0,12	0,080	78	9	74
Torf		0,004	4,3	0,3	
Fossile Brennstoffe		0,959 ... (0,268)	942	95	109
Kernenergie, ther. Reakt.	0,06	0,041	40	13	223
Kernenergie, Brutreakt.		(0,732)	2600	1600	
Vermögensenergie	0,93	1,000	982 ... 3500	203 ... 1800	218
Wasserkraft	0,07	⁶⁸	0,46·1/a	0,1·1/a	-
Windenergie			2,6·1/a		-
Sonnenenergie			3 ... 16000·1/a		-
geothermische En.			2,9·1/a	0,1·1/a	-
Gezeitenenerg.			0,3·1/a	0,004·1/a	-
Biomasse			8,6·1/a	0,54·1/a	-

Tabelle 2.3-3

Weltweiter Primärenergieverbrauch, -reserven und -ressourcen, bezogen auf den Weltenergieverbrauch von Q=350 EJ^{69, 70}.

⁶⁵ Die Umrechnung von Primärenergieressourcen erfordert Annahmen zum durchschnittlichen Energiegehalt der Energieträger oder auch einen Vergleich anhand der gewinnbaren Endenergie (z. B. bei Kernenergie). Oft wird in den Angaben eine Veranschaulichung durch t Steinkohleeinheiten (SKE) oder t Öleinheiten (ÖE) vorgenommen. 1 t ÖE entspricht ca. 1,45 t SKE und 42,6 GJ.

⁶⁶ Kommerzielle Nutzung.

⁶⁷ Anteilberechnung bei Annahme der Nutzung der Kernenergie in thermischen Reaktoren, eingeklammelter Wert bei Nutzung in Brutreaktoren.

⁶⁸ Ressourcen an Einkommensenergien sind nicht als Energien sondern als im Jahresmittel zur Verfügung stehende Leistungen anzugeben, worauf der Faktor 1/a hinweist. Die Bezugsbasis bildet damit der jahresmittlere Leistungsbedarf an Primärenergie, der etwa 11,1 TW beträgt.

⁶⁹ 1 J („Joule“): Basis-Energieeinheit im SI, entspricht 1 Ws („Wattsekunde“).

1 W („Watt“): Basis-Leistungseinheit im SI. Maßeinheitenvorsätze: k („Kilo“) = 10³, M („Mega“) = 10⁶, G („Giga“) = 10⁹, T („Tera“) = 10¹², P („Peta“) = 10¹⁵,

Wirtschaftlich gewinnbar sind nur solche Ressourcen, die einen gewinnbringenden Absatz auf dem internationalen Energiemarkt erlauben. Ihre Wirtschaftlichkeit verändert sich mit Verknappung, Änderung der Preise für konkurrierende Energien und Entwicklung neuer Förder- oder Verarbeitungstechnologien. Die Kenntnis über das Vorhandensein der Ressourcen, ihres Ausmaßes und der Qualität verändert sich mit der Erkundungstätigkeit. Des weiteren beeinflussen die Marktinteressen der Primärenergieförderer die Angaben zu den Reserven und Ressourcen. So ist es z. B. symptomatisch, daß die Angaben zur Reichweite der Erdölvorräte relativ gering und seit etwa 20 Jahren trotz zunehmender Förderung relativ konstant in Relation zur Förderung sind. Aus diesem Grunde sind die in den nachfolgenden Tabellen gemachten Angaben als begründete Schätzungen zur Ableitung eines möglichen Handlungsbedarfes anzusehen.

In Tabelle 2.3-3 sind die weltweiten Primärenergieressourcen aufgelistet. Der Bezug auf Q (als näherungsweise heutigen Primärenergieverbrauch) in der Energieangabe ermöglicht eine Aussage über die Reichweite des Energieträgers, wenn er ausschließlich eingesetzt würde und den heutigen Energiebedarf zu decken hätte. Die üblichen Reichweitenangaben in Jahren gehen davon aus, daß die Fördermenge konstant bleibt.

Es fällt auf, daß der Anteil der Energieträger Erdöl und Erdgas an der Förderung wesentlich größer ist als ihr Anteil an den Ressourcen. Das ist auf Vorteile in der technischen Handhabung, günstige Preise und die verfahrenstechnisch praktische Konkurrenzlosigkeit bei der Herstellung von Treibstoffen und Produkten der organischen Chemie zurückzuführen. Die Treibstoffproduktion und chemische Produktion zieht durch die Rohstoffzusammensetzung etwa für die Hälfte des Erdöls eine energetische Verwendung nach sich, die sich durch vertiefte Verarbeitung in der Raffinerie umgehen läßt, aber für eine breite Anwendung höhere Erdölpreise erfordert.

Bei den fossilen Energieträgern steht nur Kohle mit unbedenklich langer Reichweite zur Verfügung. Sie ist allerdings mit einer Reihe technologischer Nachteile und höheren Umweltbelastungen verbunden.

Die sich um fast zwei Zehnerpotenzen unterscheidende Angabe bei der Kernenergie macht Probleme beim energetischen Vergleich von Primärenergien deutlich. Im Prinzip bezieht man die zur Verfügung stehende Wandlungstechnologie mit in die Bewertung ein. Das Potential des Uranerzes wird nach der erzielbaren thermischen Leistung im Reaktor bewertet. Da das Uranerz nur etwa 1% des Urans als

E („Exa“) = 10^{18} .

Zum Vergleich: 1 kWh („Kilowattstunde“) = 3,6 MJ.

⁷⁰ Berechnet nach Angaben in D. Winje, D. Witt: *Energiewirtschaft und G. Erdmann: Energieökonomik*, gerundet.

spaltbares Uranisotop enthält, ist die für thermische Reaktoren ausgewiesene Leistung relativ gering. Es wird außerdem deutlich, daß sich bei ausschließlicher Einsatz thermischer Reaktoren mögliche Energieressourcenprobleme der Menschheit nicht lösen ließen, denn die relativ lange Reichweite ist auf den mit 6 % relativ geringen Kernenergieeinsatz zurückzuführen. Mit dem Einsatz von Brutreaktoren, die durch Kernumwandlung aus dem nichtspaltbaren Uranisotop spaltbares Plutonium erzeugen und Thorium als Energieressource erschließen, ergibt sich die Möglichkeit das Energieressourcenproblem langfristig zu lösen. Das setzt allerdings die Klärung noch ausstehender technologischer Fragen und die Akzeptanz von Sicherheitsrisiken voraus.

Die Kernfusion kann bezüglich ihres Sicherheits- und Gefährdungspotentials heute noch nicht abgeschätzt werden, könnte aber langfristig durchaus die Rolle eines dominierenden Energieträgers spielen.

Der Anteil der Wasserkraft an der Energiebedarfsdeckung wird in einigen Statistiken nur mit ihrem Endenergieanteil von etwa 2 % ausgewiesen. Hier wurde davon ausgegangen, daß aus der Wasserkraftnutzung Elektroenergie bereitgestellt wird, die bei Herstellung aus Brennstoffen etwa den dreifachen Energieaufwand erfordern würde und so eine Umrechnung auf Primärenergie vorgenommen.

	Erdöl		Erdgas		Steinkohle		Braunkohle		Uran		Gesamt	
	Res.	Förd.	Res.	Förd.	Res.	Förd.	Res.	Förd.	Res.	Förd.	Res.	Förd.
Deutschland	0	0	0	0	4	2	13	25	1	0	3	4
USA	4	16	5	25	23	22	30	7	8	6	16	17
GUS	7	21	38	39	19	17	31	16	25	27	21	24
China	2	5	1	1	27	32	3	7			13	8
Naher Osten	63	22	29	4							14	10
Europa	6	21	24	32	23	23	36	67	18	25	21	30
Asien	70	40	54	30	38	44	14	18	14	13	39	34
Afrika	6	9	7	3	10	5			23	19	10	6
Nordamerika	4	19	8	29	23	22	40	11	19	32	19	22
Südamerika	13	10	6	5	1	1			6	4	4	6
Australien	1	1	1	1	5	5	10	4	20	7	7	2

Tabelle 2.3-4

Verteilung der Primärenergiereserven an Vermögensenergie und ihre Nutzung in %.⁷¹

⁷¹ Berechnet nach Angaben in D. Winje, D. Witt: Energiewirtschaft und M. von Baratta: Der Fischer Weltalmanach 1996.

Bei Betrachtung der Reserven an Einkommensenergien scheint eine Nutzung von Einkommensenergien in mittelfristigen Zeiträumen mit maximal 10 bis 20% Anteil erreichbar. Der Ausweis der Biomassennutzung mit 0,54 Q erscheint unrealistisch hoch, wenn man bedenkt, daß der Sonnenenergieeinsatz für die gesamte Biomassenproduktion der Erde etwa 3 Q beträgt. Eine zu hohe energetische Nutzung könnte zu Konflikten mit der Welternährung führen. Das riesige Potential für die Sonnenenergie erscheint aus dieser Sicht und auch aus technischer Sicht völlig unrealistisch, da es von der auf der Erde ankommenden Sonnenenergie ausgeht. Mit der Größenordnung der Biomasseproduktion ergeben sich Hinweise auf die Größenordnung der terrestrisch bei Beibehaltung des Klimas zulässigen Energieumsätze.

Global gesehen, ist in für die Entwicklung der Energietechnik absehbaren Zeiträumen kein Ressourcenproblem erkennbar. Der Einsatz von Einkommensenergien kann nach heutigem Erkenntnisstand mittelfristig das Klimaproblem nicht lösen. Er muß auf jeden Fall durch Maßnahmen zur Erhöhung der Effektivität der Energiewandlung ergänzt werden, wenn das nicht sogar der Schwerpunkt der Entwicklung sein sollte. Mittelfristige Optimierungen im Brennstoffmix im Zusammenhang mit verstärktem Erdgaseinsatz und eventuellem Kernenergieeinsatz könnten diese Entwicklung unterstützen.

Die territoriale Verteilung der Primärenergien auf der Erde (Tabelle 2.3-4) macht weitere Probleme sichtbar. Sie ist derart ungleichmäßig, daß sie einen Primärenergieweltmarkt praktisch erzwingt. Die Ressourcen und ihrer Förderung sind im allgemeinen ausgeglichen. Abweichungen werden durch einen erhöhten Bedarf in industrialisierten Ländern oder niedrigeren Bedarf in dünn besiedelten Ländern oder Entwicklungsländern, Abschottungen vom internationalen Markt oder besonderen Außenhandelsstrategien hervorgerufen. Mittelfristig stimmt die Abhängigkeit des Erdölmarktes von den Ressourcen im Nahen Osten wegen der dortigen politischen Instabilitäten bedenklich. Es wird außerdem deutlich, daß sich der Energiemarkt von den Ressourcen her noch weiter zur Erdgasnutzung verschieben könnte. Der Verzicht auf die Nutzung der eigenen Kohleressourcen zur Begrenzung der CO₂-Emission wird für einige Länder (z. B. China) nur möglich sein, wenn man ihnen eine günstige Teilnahme am Energiemarkt oder die Finanzierung anderer Technologien ermöglicht.

Die Internationale Energie Agentur weist auch für das nächste Jahrzehnt einen wachsenden Weltenergiebedarf bei prinzipieller Beibehaltung des vorhandenen Energiemix aus (Tabelle 2.3-5). Die Veränderungen im Energiemix der letzten 20 Jahre zugunsten von Erdöl, Erdgas und Kernenergie auf Kosten der Kohle werden sich demnach nicht fortsetzen. Das würde bedeuten, daß sich durch die Struktur des Energiemixes keine Entlastungen bei der CO₂-Emission ergeben würden und

sowohl Primärenergieverbrauch als auch CO₂-Emission um 30 bis 40% im Vergleich zum gegenwärtigen Stand steigen würden.

⁷²	1970		1980		1990		2000		2010, ES		2010, KS	
	EJ	%	EJ	%	EJ	%	EJ	%	EJ	%	EJ	%
Erdöl	98	44	129	46	132	38	150	37	179	37	187	36
Kohle	70	32	78	28	93	27	110	27	130	27	140	27
Erdgas	40	18	53	19	74	22	81	20	96	20	115	22
Wasserkraft	13	6	17	6	23	7	31	8	39	8	40	8
Kernenergie	0,85	0	2,8	1	20	6	28	7	30	6	30	6
Sonstige	0,17	0	0,76	0	1,3	0	5,1	1	5,7	1	3,8	1
Summe	221	100	280	100	342	100	403	100	482	100	516	100

Tabelle 2.3-5

Entwicklung des weltweiten Primärenergieverbrauchs in EJ pro Jahr.⁷³

Die Vergangenheit zeigt allerdings, daß Energieprognosen mit erheblichen Unsicherheiten behaftet sind und teilweise deutlich korrigiert werden mußten. Allerdings entspricht die Vorhersage voll dem z. Z. zu beobachtenden Trend. Der Zuwachs wird größtenteils außerhalb der Industrieländer erwartet. Für China und den asiatischen Raum (außer GUS) wird eine Verdoppelung bis Verdreifachung des Energieeinsatzes erwartet. Für die Stromerzeugungskapazität wird eine Zunahme von etwa 1400 GW erwartet, was etwa der Bruttokapazität der USA und Kanadas entspricht. Der größte Zuwachs soll im Straßenverkehr mit weltweit 2,5% pro Jahr und in Asien mit 5,5 bis 6% pro Jahr realisiert werden. Die Abhängigkeit der USA von Ölimporten könnte von 48 auf 70% zunehmen.

⁷² Wasserkraft über Wirkungsgrad von 0,3 in Primärenergie umgerechnet.

⁷³ Berechnet nach Angaben in D. Winje, D. Witt: Energiewirtschaft und G. Erdmann: Energieökonomik, Weltenergieausblick der Internationalen Energie Agentur in Paris (VDI-Nachrichten, 19.5.95), gerundet. ES - Energiesparszenario: größerer Verbesserungen in der energetischen Effektivität als derzeitiger Entwicklungstrend. KS - Kapazitätsgrenzenszenario: Energienachfrage durch steigende Energiepreise gedrosselt.

74	1973		1993		1995		2000		2010	
	EJ	%	EJ	%	EJ	%	EJ	%	EJ	%
Erdöl	6,56	47	5,76	41	5,82	41	5,76	40	5,35	38
Erdgas	1,26	9	2,53	18	2,73	19	3,14	22	3,41	24
Steinkohle	2,65	19	2,15	15	2,09	15	2,03	14	1,91	13
Braunkohle	3,07	22	1,97	14	1,79	13	1,62	11	1,50	11
Kernenergie	0,14	1	1,44	10	1,50	10	1,50	10	1,50	11
sonst.	0,28	2	0,32	2,3	0,35	2,5	0,44	3,0	0,53	3,7
Summe	14,0	100	14,2	100	14,3	100	14,5	100	14,2	100

Tabelle 2.3-6

Primärenergieverbrauch der BRD in EJ pro Jahr.⁷⁵

Die Bundesrepublik Deutschland belegt den Trend für die Industrieländer (Tabelle 2.3-6). In den alten Bundesländern nahm in den zwanzig Jahren nach 1973 der Primärenergieeinsatz nur um 8% bei einer Steigerung des realen Bruttoinlandsproduktes um 56% zu. Unter Einbeziehung der neuen Bundesländer, die nach 1990 durch Effizienzgewinn und Stilllegung energieintensiver Produktionen gekennzeichnet sind, ergibt sich für diese zwanzig Jahre nur eine Steigerung des Primärenergieeinsatzes um 1%. Das belegt die für entwickelte Industrieländer typische Entkopplung zwischen Wirtschaftswachstum und Energieverbrauch.

Für die Bundesrepublik ist der zunehmende Erdgaseinsatz typisch, allerdings wird auch die verstärkte Importabhängigkeit von etwa 70% deutlich (praktisch alle Energieträger außer Kohle und Wasserkraft bei nur 10% Importabhängigkeit noch im Jahr 1960). Der kontinuierliche aber schwache Trend zu kohlenstoffärmeren Energieträgern bei Stagnation des Kernenergieeinsatzes und des Primärenergiebedarfes läßt in den nächsten 15 Jahren eine Senkung der CO₂-Emissionen um 5 bis 10% erwarten.

⁷⁴ Bei den sonstigen Primärenergien spielt die Wasserkraft die entscheidende Rolle, außerdem sind noch andere Einkommensenergien und z. B. die Effekte des Außenhandels mit Endenergien zu berücksichtigen.

⁷⁵ Berechnet nach der Analyse der Energieversorgung (VDI-Nachrichten 31.5.1995) und Prognose des Mineralölkonzerns Esso (VDI-Nachrichten 25.11.1994), gerundet.
Vgl. E. Thöne, U. Fahl: Energiewirtschaftliche Gesamtsituation.

Primärenergie, Art der Nutzung	technisches Potential in EJ / a	wirtschaftlich nutzbar ⁷⁶ in EJ / a	derzeitige Nutzung in %
Wasserkraft	0,27	0,21 ... 0,22	75
Windenergie	0,15 ... 0,90	0,04 ... 0,06	< 1
Sonnenenergie, Photovoltaik	0,18 ... 3,26	0,003	< 0,01
Sonnenenergie, Niedertemperaturwärme	... 1,96	0,02 ... 0,04	< 1
Geothermie	0,50	0,001	< 1
Nachwachsende Rohstoffe, Waldrestholz	0,14	0,02	< 10
Nachwachsende Rohstoffe, Stroh	0,10	0,003	< 2
Nachwachsende Rohstoffe, Energiepflanzen	0,84	0,05 ... 0,07	< 0,05
Nachwachsende Rohstoffe, Pflanzenöl	0,19	0,003	< 1
Nachwachsende Rohstoffe, Alkohol	0,43	0 ... 0,001	< 0,001
Abproduktnutzung, Restholz	0,05	0,03 ... 0,04	40 ... 60
Abproduktnutzung, Deponiegas	0,016	0,01	30 ... 60
Abproduktnutzung, Klärgas	0,027	0,03	60 ... 90
Abproduktnutzung, Biogas	0,092	0,001 ... 0,002	< 1

Tabelle 2.3-7

Resourcen an Einkommensenergien in der BRD⁷⁷

Als Ausweg zur Verbesserung des Primärenergiemixes erscheint oft die verstärkte Nutzung der Einkommensenergien (regenerativen Energien). Die in Tabelle 2.3-7 vorgenommene Auflistung für die BRD führt aber eher zu einer Ernüchterung, wenn man sie mit dem Bedarf von 14 EJ vergleicht. Das ändert sich auch nicht, wenn man einen möglichen Irrtum um eine Zehnerpotenz (außer bei Wasserkraft) und den relativ kurzen Umsetzungshorizont bis etwa 2000 in Rechnung stellt. Besonders die Nutzung der Windenergie hat durch Förderung und günstige Einspeisetarife in Deutschland dazu geführt, daß der regionale Anteil an der Elektroenergieerzeugung schon im Prozentbereich liegt, sich der Widerstand der Energieversorgungsunternehmen gegen das Einspeisegesetz regt und auch Umweltschützer gegen die Standorte protestieren.

Die in dieser Tabelle häufig aufgelisteten Nutzungen von Umweltwärme sind keine Primärenergienutzungen, sondern rationelle, verlustarme Gestaltungen von

⁷⁶ Annahme verschiedener wirtschaftlich relativ wahrscheinlicher Randbedingungen und Realisierung bis etwa 2000.

⁷⁷ Berechnet nach Angaben in „Erneuerbare Energien sollen in die Bresche Springen“ in Sonderteil der VDI-Nachrichten vom 17.11.1995. Vgl. Bundesminister für Wirtschaft: Abschätzung des Potentials erneuerbarer Energiequellen in der Bundesrepublik Deutschland. Bei Elektroenergieabgabe wurde in der Tabelle ein äquivalenter dreifacher Primärenergieaufwand angenommen.

Energieanwendungsprozessen, wie das schon bei den Energie- und Exergiebilanzen von Prozessen ausgeführt wurde. Auch die hier angeführte Nutzung von Abenergien bzw. Produkten ist eigentlich die Fortführung einer Wandlungskette zur Verbesserung ihrer Effektivität.⁷⁸

2.3.4.2 Bewertung der unterschiedlichen Primärenergiearten

Der Einsatz der unterschiedlichen Primärenergien ist mit typischen Wandlungstechnologien verbunden, so daß schon am Anfang der Energiewandlungskette eine erste qualitative Bewertung der Energieträger vorgenommen werden kann.

Das unterschiedliche Kohlenstoff-Wasserstoffverhältnis der fossilen Energien führt nach der Verbrennung zu unterschiedlichen CO₂- und Wasserdampfmengen. Verbunden mit den unterschiedlichen Heizwerten der Energieträger kann man so eine erste Abschätzung der CO₂-Emission bezogen auf abgegebene Wärme vornehmen. Zusätzliche in der Wandlungskette auftretende Emissionen sind damit allerdings nicht berücksichtigt. In Tabelle 2.3-8 ist dargestellt, daß eine Umstellung von Kohle auf Erdgas eine Senkung der spezifischen Emissionen um 50 bis 60 % und von Erdöl auf Erdgas von 20 bis 30 % bedeuten kann. Die Effekte können sich durch weitere technologische Vorteile noch verstärken.

Der technologische Aufwand ist durch den fluiden Zustand der Energieträger Erdöl und Erdgas besonders gering, wobei Erdöl noch Vorteile bei der Lagerhaltung und dem Transport hat, während Erdgas Vorteile bei der Verbrennung und, wegen des Fehlens von Schwefel und anderer korrosiver Bestandteile, Vorteile bei der Wärmeübertragergestaltung und weiteren Emissionen hat. Die hohen erreichbaren Verbrennungstemperaturen ermöglichen theoretisch hohe Wirkungsgrade in Motoren und Kraftwerken, erfordern aber besondere Maßnahmen zur Vermeidung der NO_x-Emission.

Der Einsatz von Kohlen als feste Brennstoffe erfordert einen wesentlich höheren technologischen Aufwand und ist bei modernen Kraftwerken mit einer Fluidisierung verbunden. Bei Braunkohle nehmen aufgrund des hohen Wassergehalts, Aschegehaltes und der oft Emissionen verursachenden Schwefelbeimengungen die technologischen Aufwendungen so zu, daß die Eigenverbräuche den Wirkungsgrad des Kraftwerkes beträchtlich senken. Bei Kohlekraftwerken ist die Kostensituation stark vom Standort (bei Braunkohle sind wegen des hohen zu transportierenden Wasseranteiles grubennahe Standorte unumgänglich) und den teilweise stark differierenden Brennstoffkosten abhängig.

⁷⁸ Vgl. K. Michalek: Optionen für alternative Energieträger.

Primärenergie ⁷⁹	t CO ₂ / TJ ⁸⁰	technologischer Aufwand	erreichbare Wirkungsgrade	zeitliche Verfügbarkeit	Kosten
Erdöl	74	++	++	++	++
Erdgas	56	++	++	++	++
Steinkohle	99	0	+	++	- ... +
Braunkohle	132	-	0	+	0 ... ++
Kernenergie	0	--	-	++	0 ... ++
Wasserkraft	0	- ... +	++	0 ... +	0 ... ++
Windenergie	0	+	0	-	- ... 0
Sonnenenergie	0	- ... +	-	--	-- ... 0

Tabelle 2.3-8

Abschätzende Bewertung unterschiedlicher Primärenergiearten

Beim Kernkraftwerk konzentriert sich der technologische Aufwand nicht nur auf das Kraftwerk, sondern ist auf den gesamten Brennstoffkreislauf verteilt und wird nur von einigen Spezialfirmen in wenigen Staaten beherrscht. Durch das hohe Gefährdungspotential spielen für Kernkraftwerke Fragen der Sicherheit, Störfallvermeidung und Risikobewertung eine technologieprägende Rolle. Die Parameter der Wärmeträgerkreisläufe erlauben bei heutigen Kraftwerken nur relativ geringe Wirkungsgrade. Allerdings ist zu berücksichtigen, daß die Kostenstruktur von Kernkraftwerken und konventionellen Kraftwerken unterschiedlich ist. Die Kostensituation kann durch die Unklarheit über die möglicherweise zu berücksichtigenden externen Kosten und die Auswirkungen neuer Sicherheitskonzepte schwer eingeschätzt werden.

Wasserkraft ist die CO₂-freie Einkommensenergie der Wahl. Allerdings ist ihre Nutzung und Bewertung (wie bei allen Einkommensenergien) stark von den Standortbedingungen abhängig.

2.3.4.3 Zukünftige Befriedigung des Primärenergiebedarfs

Die auf der Welt vorhandenen Primärenergievorräte erscheinen aus der Perspektive möglicher Technologieentwicklungen ausreichend. Bei einer Verknappung von Ressourcen müßten sich diese Energieträger so stark verteuern, daß sie Innovationspro-

⁷⁹ Qualitative Einschätzung: ++ sehr günstig, 0 neutral, -- sehr ungünstig

⁸⁰ Für die Verbrennung, bezogen auf die thermische Leistung bei vollkommener und vollständiger Verbrennung.

zesse zur Entwicklung von „Backstop-Technologien“ in Gang setzen.⁸¹ Solche Entwicklungen wären zur Senkung des Primärenergieeinsatzes und zur Senkung der CO₂-Emission wünschenswert. Aus der Sicht der Ressourcen ist eine solche Entwicklung z. Z. allerdings nicht zu erwarten, da sich die allgemein verfügbare Ressource Umwelt einer Bewertung entzieht. Das erfordert eine internationale politische Willensbildung zur Bewertung der Ressource Umwelt.

Die Primärenergieressourcen sind territorial sehr unterschiedlich verteilt, was zu internationalen Primärenergiemärkten führt. Diese Märkte führen zu internationalen Abhängigkeiten. Durch die Konzentrierung der Erdöl- und Erdgasressourcen auf den Nahen Osten, der als politisch instabil erscheint, ergibt sich ein internationales Konfliktpotential. Obwohl der Erdölmarkt selbst während des Golfkrieges stabil blieb, sollte man auf Instabilitäten beim Erdölpreis und der Erdölversorgung vorbereitet bleiben.

Während in den Industrieländern ein Stagnieren des Primärenergieverbrauchs auf hohem Niveau zu verzeichnen ist, besteht in den Entwicklungsländern ein beträchtlicher Nachholebedarf. Die Industrieländer sollten durch technologische und wirtschaftliche Maßnahmen einen Ausgleich der zu erwartenden erhöhten CO₂-Emissionen der Entwicklungsländer anstreben. Die bisher prognostizierten Trends erscheinen in diese Zusammenhang noch nicht ausreichend.

Die Einkommensenergien (regenerative Energien) bieten unter den derzeitigen Randbedingungen nicht die Möglichkeit zur Lösung des Problems. Derzeit wird ihr möglicher Beitrag eher als bescheiden eingeschätzt. Gegen die Kernenergie sprechen im wesentlichen Akzeptanzprobleme in den Industrieländern, obwohl sie bei technologischer Weiterentwicklung einen wesentlichen Beitrag zur Problemlösung leisten könnte. Ein wesentlicher Beitrag zur Lösung des Problems kann in einer Verbesserung der Energiewandlung und einer Senkung nicht nur des spezifischen, sondern auch des absoluten Energieverbrauchs bestehen.

Die teilweise geäußerten Forderungen nach einseitigen technologischen Entwicklungen und Förderungen bestimmter Primärenergien erscheinen sowohl aus der Sicht der zur Verfügung stehenden Ressourcen als auch Wandlungstechnologien nicht gerechtfertigt. So kann z. B. ein finanzieller Einsatz zur effektiven Gestaltung konventioneller Technologien in Entwicklungsländern eine größere CO₂-Minderung bewirken als der Einsatz für Photovoltaik in der BRD. Aus heutiger Sicht erscheint eine relativ langfristige Beibehaltung des derzeitigen Primärenergiemixes bei langfristigem Trend zu den Einkommensenergien wahrscheinlich. Allerdings bleibt auch bei Nutzung von Einkommensenergien (regenerativer Energien) die Forderung nach Beschränkung des Primärenergieeinsatzes durch Effektivitätserhöhung bei der Energiewandlung erhalten, da die Energieumsätze der Menschheit terrestrische

⁸¹ Vgl. zur Rolle von Backstop-Technologien in G. Erdmann: Energieökonomik.

Dimensionen erreicht haben und eine kontrollierte Umweltgestaltung auch bei Nutzung dieser Energieformen notwendig ist.

2.3.5 End- und Nutzenergien

Die Endenergien kennzeichnen den Energiemarkt und die Abgabe von Energieträgern an die Energieverbraucher. Die Energiestatistiken sind nach Sektoren und Verbrauchergruppen gegliedert und erlauben eine Abschätzung möglicher Verbrauchsentwicklungen und Einsparpotentiale.

Die Endenergien enthalten sowohl Primärenergieträger nach Förderung und Verteilung als auch Gebrauchsennergien nach verlustreichen Umwandlungsstufen, wie Fernwärme oder Elektroenergie. In den Ausführungen zur Energiekette (s. Abschnitt 2.3.3) wurde bereits deutlich, daß diese Energien sowohl hinsichtlich ihrer Umwandelbarkeit als auch des kumulierten Energieaufwandes in der Energieumwandlungskette nicht vergleichbar sind. So repräsentiert die Elektroeneergieeinheit etwa den 3 bis 4fachen Primärenergieaufwand im Vergleich zur Energieeinheit Brenn- oder Treibstoff. Bei der Fernwärme kann dieser Faktor zwischen etwa 0,6 bis 1,3 schwanken, je nach Wärmeparametern und Bereitstellungstechnologie. Aus diesem Grunde erfordert die Interpretation der Statistiken die Einbeziehung der vorherrschenden Wandlungstechnologien und ihres Innovationspotentials.

Der sogenannte nichtenergetische Verbrauch der Primärenergie (z. B. Verwendung von Erdöl für die Petrochemie) von ca. 7% in der BRD und statistische Differenzen und Verluste im Energiesektor von ca. 29% bilden die Differenz zwischen Primärenergie- und Endenergiebilanz. Die Energiebilanz der Bundesrepublik wies 1994 einen Primärenergieverbrauch von 14 PJ, einen Endenergieverbrauch von 9 PJ und eine bereitgestellte Nutzenergie von 4,4 PJ aus. Das Verhältnis der Energieströme zwischen der ersten Energieumwandlung und nachfolgenden Energieanwendung (Primärenergie zu Endenergie zu Nutzenergie) von etwa 3:2:1 verdeutlicht die Bedeutung einer Verbesserung der Energie- und Stoffwandlungsprozesse. Da nur etwa ein Viertel der Nutzenergie als mechanische Energie und etwa die Hälfte der Nutzenergie als Raumwärme mit extrem niedrigen Parametern bereitgestellt wird, würde eine exergetische Bewertung diese Aussage noch etwa um den Faktor Drei verschärfen.

2.3.5.1 Energiebedarf nach Sektoren

In Tabelle 2.3-9 ist die Verteilung der Endenergieträger auf die volkswirtschaftlichen Sektoren der BRD (Spalten der Tabelle, in Zeile „Anteile an Energieträger“)

und die Struktur der Versorgung der Sektoren mit verschiedenen Endenergien (Zeilen der Tabelle, in Zeile „Anteile an Sektor“) dargestellt.

Sektor	Anteil an	Kohle	Fernwärme	Holz/Torf	Öl	Kraftstoff	Gas	Strom	Summe
Industrie	Sektor	19,9	2,9	0,2	12,5	0,1	37,4	27,1	100,0
	Energieträger	74,8	19,4	11,3	18,6	0,1	43,2	43,0	27,2
Verkehr	Sektor					97,8		2,2	100,0
	Energieträger					94,1		3,6	28,2
Haushalt	Sektor	4,4	6,9	1,5	33,9		34,4	18,8	100,0
	Energieträger	16,3	45,6	71,7	49,7		39,0	29,4	26,7
Kleinverbraucher	Sektor	3,6	7,8	0,5	32,2	9,5	23,5	23,0	100,0
	Energieträger	8,9	35,0	17,0	31,7	5,8	17,8	24,0	17,9
Summe d. Sektoren	Sektor	7,2	4,0	0,6	18,2	29,3	23,6	17,1	100,0
	Energieträger	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tabelle 2.3-9

Endenergiebedarf der Verbrauchssektoren der BRD 1994, Anteile in %
(Gesamtbedarf 9 EJ pro Jahr).⁸²

Kohle wird vorwiegend im Energieversorgungssektor und in der Industrie eingesetzt. Sie ist für die Energieanwendung mit etwa 7 % Endenergieanteil relativ bedeutungslos. Der noch vorhandene Einsatz in Haushalten (vorwiegend neue Bundesländer) stellt aus Umweltschutz-, Komfort- und energietechnischen Gründen ein kurzfristiges Substitutionspotential für Fernwärme, Erdgas oder Erdöl dar und wird eine Senkung des Primärenergiebedarfes und der CO₂-Emissionen bewirken, wenn die Erhöhung der Komfortansprüche durch Wärmeschutzmaßnahmen ausgeglichen wird.

Der Fernwärmeeinsatz konzentriert sich auf Haushalte und Kleinverbraucher und ist mit einem Anteil von 4 % aus energietechnischer Sicht zu gering. Er sollte höher sein, weil er eine Methode darstellt, effektiv aus Brennstoffenergie Niedertemperaturwärme zu erzeugen. Der effektive Einsatz erfordert wegen der vorhandenen Transportprobleme allerdings einen räumlich relativ konzentrierten Wärmebedarf. Tendenzen zur Zersiedlung der BRD und die Notwendigkeit, die gekoppelte Elektroenergieerzeugung mit dem Bedarf abzustimmen, erschweren einen weiteren Fernwärmeeinsatz. Der Ersatz reiner Heizwerke durch Kraft-Wärme-

⁸² Nach B. Geiger, H. Heß: Energiewirtschaftliche Daten.

Kopplung leistete in den letzten Jahren einen Beitrag zur Effektivitätserhöhung in den neuen Bundesländern.

Die Endenergieträger Öl und Gas sind auf die Sektoren relativ gleichmäßig verteilt. Ein gewisser Schwerpunkt bei den Haushalten ergibt sich durch die Bedeutung für die Raumwärmebereitstellung. Die Konzentration der Treibstoffe auf den Sektor Verkehr und die Kleinverbraucher (z. B. für landwirtschaftliche Nutzfahrzeuge) ergibt sich durch die statistische Abgrenzung. Die Lösung von Transportproblemen und der damit verbundene Energieaufwand berührt funktional und strukturell die gesamte Volkswirtschaft. Die mit „just in time“ Lieferungen und „lean production“ verbundenen Energieaufwendungen wären z. B. in nicht unbeträchtlichem Maße der Industrie zuzuordnen. Auch bei den Haushalten wäre ein nicht unbeträchtlicher Beitrag auszuweisen. Ein Durchschnittshaushalt der Bundesrepublik verbindet etwa ein Drittel seines Energieaufwandes mit dem eigenen Personenkraftwagen.

Der Elektroenergieeinsatz ist mit 43 % auf die Industrie konzentriert, was die Bedeutung der Elektroenergie für moderne Produktionstechnologien unterstreicht. Die Bedeutung unter den Endenergien erscheint mit 17 % relativ gering. Berücksichtigt man aber, daß in der Elektroenergie schon beträchtliche Primärenergie kumuliert ist, wächst das Gewicht auf etwa 42 %. Der Elektroenergieeinsatz ist in der Bundesrepublik seit 1988 etwa konstant geblieben und hat durch die seitdem erfolgte Senkung des Primär- und Endenergieverbrauches um etwa 8 % relativ an Bedeutung gewonnen. Moderne technologische Entwicklungen in Verbindung mit Hochtemperaturverfahren lassen sogar eine absolute Steigerung des Elektroenergieeinsatzes bei sinkendem Endenergieeinsatz möglich erscheinen.

Die Sektoren Industrie, Verkehr und Haushalt sind mit 26 bis 28 % Anteil am Endenergieeinsatz etwa gleichbedeutend. Bezieht man den in der Elektroenergie kumulierten Energieaufwand in die Bewertung mit ein, erhöht sich die Bedeutung der Industrie auf etwa 32 %, während die Sektoren Verkehr und Kleinverbraucher Änderungen auf etwa 20 % (bei gleichbleibender Bewertung des Sektors Haushalte) erfahren.

In den letzten Jahren konzentrierten sich die Bestrebungen zur Erhöhung der Effektivität aus Gründen des Klima- und Emissionsschutzes auf die Haushalte (Wärmeschutzverordnung, Wärmenutzungsverordnung). Damit wird aber etwa nur ein Drittel des Potentials erreicht. Aufgrund der technologischen Vielfalt scheinen für die Industrie kaum Standardvorgaben möglich. Hier besteht das Problem darin, günstige Randbedingungen zu schaffen, die Innovationsprozesse in Gang setzen.

2.3.5.2 Energiebedarf nach Energiearten

In Tabelle 2.3-10 ist der Endenergiebedarf für die Bereitstellung verschiedener Nutzenergiearten in verschiedenen Verbrauchssektoren dargestellt. Es wird deutlich, daß etwa 60 % der Endenergie zur Wärmebereitstellung und etwa 40 % zur Bereitstellung mechanischer Energie verwendet werden. Der Einsatz für Beleuchtungszwecke erscheint mit etwa 2 % gering. Bedenkt man aber, daß hierfür Elektroenergie eingesetzt wird, übersteigt der durch Energiesparlampen erreichbare Effekt (zumal diese heute in den meisten Fällen wirtschaftlich sind) den in nächster Zeit durch regenerative Energien erreichbaren Nutzen (s. Abschnitt 2.3.4).

Die ausgewiesenen Nutzenergien sind oft die letzte Stufe vor der eigentlichen Energiedienstleistung und deshalb bei der technischen und technologischen Gestaltung selbst Gegenstand der Optimierung. Prozeßwärmeinsatz ist im allgemeinen technologisch bedingt und beeinflussbar, hier besteht die Zielstellung in der Konstruktion einer für den Energieeinsatz günstigen Stoffwandlungskaskade (s. Abschnitt 2.3.6). Raumwärmeinsatz dient im allgemeinen der Deckung von Wärmeverlusten und kann durch Isolation und Lüftung in extremen Ausmaß beeinflusst werden, besteht das Ziel doch nur in der Erhaltung eines Behaglichkeitszustandes. Als mechanische Energien werden im allgemeinen Energieabgaben von Antrieben angegeben, der Energiebedarf für Bewegungsänderungen läßt sich aber durch Gestaltung der Bewegungsabläufe, Verminderung der Reibungsverluste und Transportoptimierung beeinflussen. Beleuchtung dient im allgemeinen der Unterstützung des menschlichen Sehens, ihre Notwendigkeit läßt sich z.B. durch Raum- und Farbgestaltung, Leuchtdichtenverteilung und Arbeitsorganisation beeinflussen.

Der Sektor Industrie wird durch den Einsatz von Prozeßwärme und mechanischer Energie für Verarbeitungs- und Förderprozesse geprägt. Die Prozeßwärme verursacht etwa 19 % des gesamten Endenergiebedarfs und ist zu 3/4 in der Industrie konzentriert. Da es sich hierbei um Wärme mit einer relativ hohen Temperatur handelt, spielen für die Effektivität nicht nur die Prozesse ihrer Bereitstellung, sondern auch ihrer sinnvollen Abarbeitung eine entscheidende Rolle. Die Gestaltung von Energiekaskaden ist eine selbständige technologische Aufgabe mit beachtlichen Sparpotentialen (s. Abschnitt 2.3.6). Der auf energetischer Basis ermittelte Nutzungsgrad von 58 % macht das durch technische Innovationen erschließbare Potential noch nicht in vollem Umfang sichtbar.

Sektor	Nutzenergieart	Endenergiebedarf dafür			Nutzenergie		
		in PJ	Anteil v. Sektor in %	Anteil v. Gesamt in %	Nutzgs.-grad in %	in PJ	Anteil v. Nutzart in %
Industrie	Prozeßwärme	1673	68,4	18,6	58,0	970	74,0
	Raumwärme	265	10,8	2,9	69,0	183	8,9
	mechanische Energie	470	19,2	5,2	64,0	301	29,9
	Beleuchtung	39	1,6	0,4	9,0	4	33,3
	insgesamt	2447	100,0	27,2	Ø 59,6	1458	33,0
Verkehr	Prozeßwärme	0	0,0	0,0	-	0	0,0
	Raumwärme	3	0,1	0,0	70,0	2	0,2
	mechanische Energie	2535	99,8	28,2	18,0	456	45,3
	Beleuchtung	3	0,1	0,0	7,5	0	0,0
	insgesamt	2541	100,0	28,2	Ø 18,0	458	10,4
Haushalt	Prozeßwärme	393	16,4	4,4	46,0	181	13,8
	Raumwärme	1812	75,5	20,1	72,0	1305	63,2
	mechanische Energie	154	6,4	1,7	40,0	62	6,2
	Beleuchtung	41	1,7	0,5	6,0	2	16,7
	insgesamt	2400	100,0	26,7	Ø 64,6	1550	35,1
Kleinverbraucher	Prozeßwärme	371	23,0	4,1	43,0	160	12,2
	Raumwärme	839	52,0	9,3	71,0	596	28,8
	mechanische Energie	317	19,7	3,5	59,0	187	18,6
	Beleuchtung	85	5,3	0,9	7,0	6	50,0
	insgesamt	1612	100,0	17,9	Ø 58,9	949	21,5
Verbrauchs-sektoren insgesamt	Prozeßwärme	2437	27,1	27,1	53,8	1311	100,0
	Raumwärme	2919	32,4	32,4	71,5	2066	100,0
	mechanische Energie	3476	38,6	38,6	28,9	1006	100,0
	Beleuchtung	168	1,9	1,9	7,1	12	100,0
	insgesamt	9000	100,0	100,0	Ø 49,0	4415	100,0

Tabelle 2.3-10

Endenergiebedarf für die Nutzenergiebereitstellung der Verbrauchssektoren der BRD 1994⁸³

Der Verkehrssektor wird durch die Umwandlung von Treibstoffen geprägt. Der ausgewiesene geringe Nutzungsgrad von 18 % läßt Reserven von wenigstens 1/3 für das Antriebskonzept bei Weiterentwicklung der konventionellen Technik erwarten. Bei Realisierung innovativer Konzepte sind noch größere Einsparungen möglich. Der Sektor Haushalt wird zu 3/4 durch die Raumwärme geprägt. Der Anteil von 20 % hebt die Bedeutung der Bestrebungen zum Niedrigenergiehaus hervor. Da der Erneuerungszyklus im Hausbau aber nach Jahrzehnten zu rechnen ist, ist mit einer

⁸³ Nach B. Geiger, H. Heß: Energiewirtschaftliche Daten.

Senkung des Primärenergiebedarfs um 10 % durch solche Maßnahmen erst in etwa 20 Jahren zu rechnen. Das erschließbare Potential ist noch größer, wenn man Maßnahmen zur Isolierung und Einsatz moderner Heizkessel durch städtebauliche und architektonische Maßnahmen (z. B. passive Sonnenenergienutzung) und vor allem moderne Verfahren zur Bereitstellung von Niedertemperaturwärme (Kraft-Wärme-Kopplung in Verbindung mit Fernwärme, Blockheizkraftwerke in Verbindung mit Nahwärme, Wärmepumpen) ergänzt. Der Einsatz von mechanischer Energie und Prozeßwärme weist auf die Bedeutung der elektrischen und elektronischen Haushaltgeräte hin. In der Vergangenheit stand einer ständigen Erhöhung der energetischen Effektivität eine Erhöhung des Ausstattungsgrades gegenüber, so daß der Elektroenergiebedarf der Haushalte stieg.

Der Sektor Kleinverbraucher ist aus der Sicht der Energiewandlung heterogen. Die in den anderen Sektoren gemachten Aussagen treffen auf ihn anteilig zu. Der hohe Beleuchtungsanteil weist auf in diesem Sektor enthaltene Dienstleistungsbereiche hin. Hier lassen sich durch Gebäudemanagementsysteme Energieeinsparungen erzielen.

2.3.5.3 Entwicklung des Energiebedarfs

In der Diskussion des Endenergieeinsatzes wurde darauf hingewiesen, daß Einsparungen von 10 bis 20 % der Endenergie in 10 bis 20 Jahren durch verstärkte Nutzung bekannter Techniken für die BRD als realistisch erscheinen. Schwerpunkte bilden dabei der Raumwärmebereich und die Antriebsentwicklung. Für diese Entwicklungen erscheinen die gesetzten rechtlichen und wirtschaftlichen Bedingungen ausreichend. Eine solche Entwicklung würde aber für Ziele zur Erhaltung der Umwelt zu langsam verlaufen.

Beträchtliche weitere Sparpotentiale sind in der Industrie, insbesondere im Prozeßwärmebereich, und in der Energieversorgung, insbesondere bei der Elektroenergieerzeugung, zu vermuten. Die Bedeutung der Elektroenergieerzeugung wird weiter zunehmen, weil ihr Anteil an den Endenergieträgern wächst und aus technologischer Sicht sogar ein absolutes Wachstum in der Industrie möglich erscheint. Die in den letzten Jahren zu beobachtenden Verbrauchssenkungen im industriellen Sektor waren im wesentlichen Ergebnis struktureller Veränderungen (z. B. Verlagerung energieintensiver Produktionen wie Stahl- oder Aluminiumerzeugung in das Ausland) und nicht so sehr Ergebnis technischer Innovationen. Die Umweltbelastung wird damit nicht verringert, sondern nur aus dem Bilanzkreis verschoben. Technische Innovationen in der Industrie zur Senkung des Energieeinsatzes scheinen Veränderungen in den wirtschaftlichen und rechtliche Rahmen-

bedingungen zu erfordern (s. Abschnitt 2.3.2). Außerdem ist die wirtschaftliche Gesamtsituation von Einfluß.

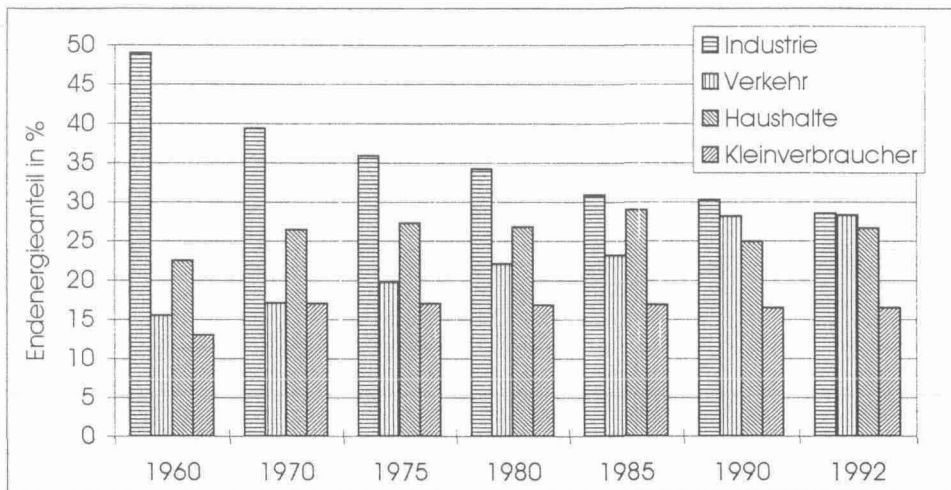


Abbildung 2.3-8

Entwicklung des Endenergiebedarfes der Sektoren der BRD
(alte Bundesländer)⁸⁴

In der verarbeitenden Industrie werden Energiewandlungsprozesse oft als Hilfsprozesse angesehen und zuletzt optimiert. Eine stabile Marktposition und langfristige Markt- und Produktionsperspektiven fördern eine Optimierung der Energiewandlungsprozesse, kurzfristige Produktionsperspektiven lassen Investitionen in Energiesparmaßnahmen als uneffektive Kapitalbindung erscheinen. In diesem Sinne erscheint auch das Erbringen von Energiedienstleistungen durch selbständige Unternehmen in Gewerbe- oder Industrieparks entwicklungs-fähig. Solche Entwicklungen sind z. B. an den Industriestandorten Leuna und Buna und im Gewerbepark Bitterfeld in den neuen Bundesländern zu verzeichnen. Verschiedene effektivitätssteigernde Maßnahmen müssen allerdings technologieimmanent sein, weil sie synergetische Effekte aus der Kopplung von Energie- und Stoffwandlung erschließen.

⁸⁴ Nach Zentralverband Elektrotechnik- und Elektroindustrie e. V.: Energie auf einen Blick 1992 und RWE: Energieflußbild der Bundesrepublik Deutschland 1992 (alte Bundesländer).

Das Erbringen einer Energiedienstleistung ist mit dem Gedanken des „Least-Cost Planning“ verbunden. Der Grundgedanke besteht darin, daß der Dienstleister die Nutzenergie (auch für den Haushalts- und Kleinverbrauchssektor) bereitstellt und die erhöhten Aufwendungen für die Energieanwendung durch Einsparungen bei der Energieerzeugung kompensiert. Untersuchungen deutscher Energieversorgungsunternehmen konnten unter den gegebenen Randbedingungen keine positiven wirtschaftlichen Effekte nachweisen.

Aus Abbildung 2.3-8 wird die zeitliche Entwicklung der Struktur des Endenergieverbrauchs der BRD ersichtlich. Die abnehmende Bedeutung der Industrie ist im wesentlichen durch Strukturwandel bedingt. Die zunehmende Bedeutung des Verkehrswesens stimmt allerdings bedenklich. Hier können alle bisher festgestellten positiven Effekte wieder aufgezehrt werden. Insbesondere die Zunahme des Güterverkehrs ist Ergebnis der internationalen Arbeitsteilung und der Globalisierung der Märkte. Sie ist aus der Sicht der Produktionssysteme ein positiver Effekt und trägt zur Erhöhung ihrer Effektivität bei. Dieser Effekt unterliegt aber gleichfalls einer Optimierung. Wird der Aufwand zur Erbringung der Transportleistung zu niedrig bewertet, wird das Gesamtsystem in seiner wirtschaftlichen Entwicklung geschwächt und werden außerdem Umweltressourcen verschwendet. Aus dieser Sicht erscheint eine wirtschaftliche Lenkung und Optimierung der Verkehrssysteme innerhalb der EG auch als energiewirtschaftliche Notwendigkeit. Außerdem wird ein beträchtlicher Teil der Transportleistungen nicht durch die Notwendigkeit der effektiven Gestaltung der Produktionssysteme und der Verteilung der Produkte sondern durch länderspezifische finanzielle Randbedingungen hervorgerufen. Diese Effekte wirken aus nationaler Sicht der Produktionssysteme oft kontraproduktiv, weil sie in der Tendenz zu einem nationalen Arbeitskräfteabbau führen.

2.3.6 Techniken und Technologien zur Energiewandlung und -bereitstellung

Die Darstellungen in diesem Abschnitt sollen prinzipielle Verminderungsmöglichkeiten bei den Verlusten der Energie- und Stoffwandlung aufzeigen und absehbare Entwicklungen bewerten. Dabei werden strategische Überlegungen im Vordergrund stehen, die sich aus der Analyse der Energiewandlungsprozesse ergeben.

2.3.6.1 Energietechnische Grundprozesse

Die energietechnischen Grundprozesse wurden beispielhaft nach ihrer Bedeutung für die Effektivität der Energiewandlung ausgewählt. Das betrifft sowohl die Energieumsätze als auch die Größenordnung der Verluste.

2.3.6.1.1 Verbrennung

Die Verbrennung steht für etwa 80 % des Primärenergieverbrauches der BRD an der Spitze der Energiewandlungskette⁸⁵ zur Nutzenergie. Ihre Effektivität prägt damit den bestmöglichen Grenzwert für die Energiewandlungskette. Die Bedeutung wird auch dadurch unterstrichen, daß etwa 30 % des Primärenergieverbrauches in den ersten Umwandlungsstufen im Energieversorgungssektor verlorengehen.

Die Verbrennung stellt eine exotherme chemische Reaktion zwischen dem Brennstoff und Verbrennungsluft dar. In den meisten Fällen steht das Ziel der Energiegewinnung, in anderen Fällen aber auch das der Abfallbeseitigung, also der Stoffwandlung, im Vordergrund. Das als Reaktionsprodukt entstehende Rauchgas enthält (wegen der i. a. im Brennstoff enthaltenen Hauptbestandteile Kohlenstoff und Wasserstoff) vorwiegend CO₂ und Wasser und den an der Reaktion nicht beteiligten Stickstoff. Die Grundreaktion liefert damit völlig unbedenkliche Abprodukte, deren energetische und exergetische Bewertung nach entsprechender Abkühlung Werte nahe Null liefert. Die Bedeutung des CO₂ als Treibhausgas rührt aus der durch anthropogene Wirkung verursachten Größenordnung der Umsätze und der dadurch hervorgerufenen Störung der regulierenden Wirkung des dynamischen Gleichgewichtes zwischen Flora und Fauna und des Energietransportes der Erde. Brennstoffbeimengungen wie Schwefel und Stickstoff (und Chlor oder andere Halogenide bei Abprodukt- oder Müllverbrennungen) können zu schädlichen oder sogar toxischen Abprodukten führen. Der wirkliche Mechanismus der Verbrennung ist wesentlich komplexer und beinhaltet z. B. den Übergang vom Brennstoff in die reagierende Phase, eine Reihe von Gleichgewichtsreaktionen (die z. B. bei hohen Temperaturen zur NO_x-Bildung führen, andererseits aber gebildete Dioxine wieder spalten) und Wärmezufuhr und -abfuhr, die die Stoffwandlungsprozesse beeinflussen. Eine realistische experimentelle Untersuchung und Modellierung dieser Vorgänge ist erst in neuerer Zeit möglich (z. B. durch Lasertechnik, komplexe Rechenmodelle in Verbindung mit leistungsfähiger Rechentechnik). Mangelnde Beherrschung der Prozesse führt z. B. zum Ausstoß von CO und unverbrannten Koh-

⁸⁵ Das gilt nur, wenn man von nichtsignifikanten Prozessen wie Förderung, Konfektionierung, Transport und Lagerung absieht.

lenwasserstoffen (unvollkommene Verbrennung) mit den Abgasen und Ausstoß von unverbranntem Brennstoff mit den Rückständen und Abgasen (unvollständige Verbrennung).

Die Probleme lassen sich mit den aus der industriellen Stoffwandlung bekannten Mitteln und Methoden lösen, wobei die hohen Temperaturen und hohen Leistungsdichten und geringer zur Verfügung stehender Raum (z.B. bei Motoren) erschwerend wirken. Sie sind im fluiden Zustand (z.B. Verbrennung von Erdgas und -öl) wesentlich leichter lösbar als im festen Zustand (z.B. Verbrennung von Kohle). Nachgeschaltete Techniken (z.B. Kraftwerkseinstickung und -entschwefelung, Abgaskatalysator, Rußfilter) sind weniger effektiv wie prozeßimmanente Maßnahmen (Wirbelschichtfeuerung mit Additiven, Optimierung der Aufbereitung des Brennstoffgemisches und der Zündung, Mehrstufigkeit der Verbrennung, Optimierung der Wärmeabfuhr). Die sich ergebenden technologischen Lösungen verschieben die Optima in Auslegung und Betriebsführung für Kraftwerke und Verbrennungsmotoren. Das Nichtbeherrschen dieser Probleme führt zu Umweltbelastungen wie z.B. dem sauren Regen und der Bildung von bodennahem Ozon aus photochemischen Gleichgewichtsreaktionen unter Beteiligung unverbrannter Kohlenwasserstoffe und NO_x .

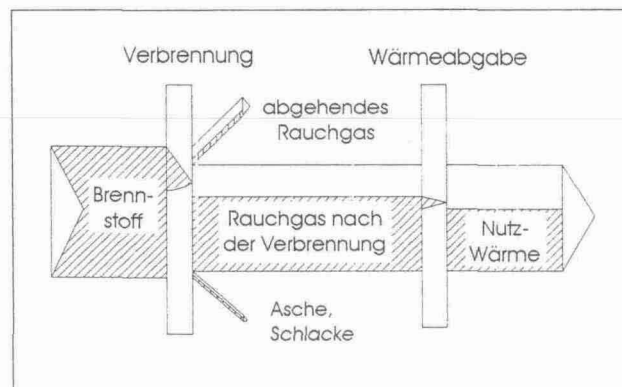


Abbildung 2.3-9

Energie- und Exergiefluß der Verbrennung

Für die Bewertung der Verluste und ihrer Beeinflussbarkeit spielen die energetischen Besonderheiten der Verbrennung eine entscheidende Rolle (Abbildung 2.3-9).

Die Energie des Brennstoffes stellt i. a. reine Exergie dar. Bei der chemischen Reaktion wird diese Energie in thermische Energie der Verbrennungsgase umgesetzt, die nur begrenzt umwandelbar ist, und schon zu Exergieverlusten von 20 bis 30 % durch Wahl des Wirkprinzipes führt. Hohe Verbrennungstemperaturen (z. B. bei Brennstoffen mit hohen Heizwerten, Zufuhr vorgewärmter Verbrennungsluft, Einsatz von Sauerstoff anstatt Luft) verringern diese Verluste. Prinzipiell sind sie aber an das Wirkprinzip gebunden und nur durch reversibler Wandlungsverfahren, wie die Brennstoffzelle (die aber eine Brennstoffkonversion in Wasserstoff erfordert) vermeidbar.

Die energetischen Verluste durch Asche und Schlacke betragen bei festen Brennstoffen einige Prozent und sind verfahrenstechnisch nur schwer verringerbare. Die Energieverluste mit den Rauchgasen und auch durch mangelnde Isolierung betragen energetisch etwa 15 % und exergetisch etwa 5 %. Große Luftmengen für die Verbrennung erhöhen mit der Rauchgasmenge diese Verluste, weswegen man i. a. bestrebt ist, nur das stöchiometrisch notwendige Minimum ($\lambda=1$), zusätzlich eines für die vollkommene und vollständige Verbrennung notwendigen Überschusses, zuzuführen. Bei festen Brennstoffen ist der notwendige Luftüberschuß von 30 bis 40 % am höchsten. Die Einhaltung der optimalen Verhältnisse erfordert Wartungs- und Instandhaltungsaufwand. Bei Verbrennungsmotoren ist auch eine entgegengesetzte Entwicklung zu den Magermixmotoren zu erkennen. Die erzielbaren Vorteile durch Verringerung der Schadstoffemissionen sind dem erhöhten Aufwand für die energetische Effektivität entgegenzustellen. Die Rauchgasverluste sind durch Abkühlung der Rauchgase bis auf Umgebungstemperatur vermeidbar, wobei technische Probleme durch Korrosion (Schwefelsäuretaupunkt), mangelnden thermischen Zug (Einsatz von Lüftern und Erhöhung der Schornsteinhöhe kann notwendig werden) und durch fehlende Wärmesenken zur Einbindung der Nutzwärme auftreten können. Die häufigste, älteste und einfachste Lösung ist der Einsatz der Rauchgasabwärme zur Brennstoff- und Verbrennungsluftvorwärmung. Bei Kraftwerken und Heizkesseln im Sanitärwärmebereich besteht noch die Möglichkeit der Wasservorwärmung. Bei Erdgaseinsatz sind die technische Voraussetzungen so günstig, daß der Einsatz sogenannter Brennwertkessel im Raumheizungsbereich fortgeschrittener Stand der Technik ist. Der damit erreichbare Wirkungsgrad über Eins ist darauf zurückzuführen, daß er gewöhnlich auf den unteren Heizwert bezogen wird. Dieser setzt voraus, daß die Kondensationswärme des im Rauchgas enthaltenen Wasserdampfes (die bei Erdgas besonders hoch ist) nicht genutzt wird. Hier wird aber eine Abkühlung bis zur Kondensation durchgeführt, die im Brennwert berücksichtigt wird. Die ausgewiesene Einsparung bezieht sich allerdings auf konventionelle Heizkessel und nicht auf andere bessere Möglichkeiten der Wärmebereitstellung (z. B. Kraft-Wärme-Kopplung).

Der exergetische Gesamtwirkungsgrad beträgt⁸⁶

$$\eta_{ex} \equiv \eta_{th} * \frac{T_{m,N} - T_U}{T_{m,N}}$$

Damit wird deutlich, daß für die Effektivität nicht nur die Senkung der energetischen Verluste, sondern auch die Erhöhung des Temperaturniveaus der Nutzwärme bedeutungsvoll ist.

Wenn das Rauchgas nicht selbst Arbeitsmittel nachfolgender Energiewandlungen ist (z. B. bei Verbrennungsmotoren, Gasturbine) besteht die Notwendigkeit der Umwandlung seiner thermischen Energie in die eines Arbeitsmittels (Dampferzeugung mit möglichst hohen Parametern im Kraftwerk, Heizdampferzeugung, Warmwassererzeugung, Erwärmung von Thermalölen) durch Wärmeübertragung. Überkritische Dampfparameter in modernen Kraftwerken erlauben dabei besonders hohe Wirkungsgrade der nachfolgenden Umwandlung. In einem Dampfkraftwerk ist an dieser Stelle etwa 50 % der eingesetzten Exergie (aber nur etwa 20 % der Energie) verloren. Verbesserungsmöglichkeiten ergeben sich durch Kopplung mit Hochtemperaturprozessen (z. B. Gasturbine im Kombi- oder GuD-Kraftwerk). Besonders ungünstig ist die Situation bei der Bereitstellung von Niedertemperaturwärme, da hier ohne vorgeschalteten Prozeß die Exergie zu wenigsten 85 % verloren ist und im Prinzip nur zur Verringerung der Wärmeübertragungsfläche eingesetzt wurde.

2.3.6.1.2 Wärmeübertragung

Neben der Verbrennung ist die Wärmeübertragung die größte Verlustquelle in der Energiewandlung, obwohl ihr Energiefluß nahezu verlustfrei aussieht (Abbildung 2.3-10).

⁸⁶ η_{ex} - exergetischer Wirkungsgrad, η_{th} - thermischer Wirkungsgrad, $T_{m,N}$ - Mitteltemperatur der Nutzwärme, T_U - Umgebungstemperatur

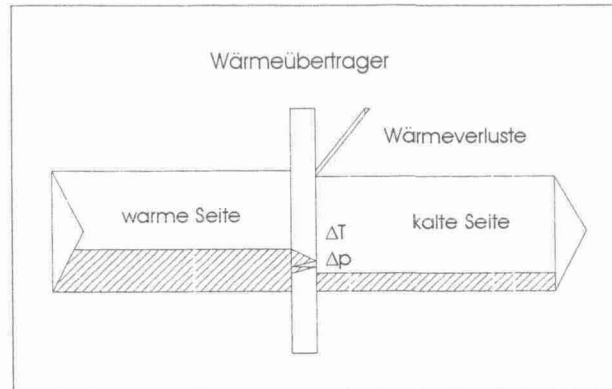


Abbildung 2.3-10

Energie- und Exergiefluß der Wärmeübertragung

Die Energieverluste betragen i. a. weniger als 2 bis 3 % und sind durch Isolierung und Strömungsführung beeinflussbar. Die Exergieverluste entstehen im wesentlichen durch Abbau der Triebkraft ΔT zwischen der wärmeabgebenden (warmen) und wärmeaufnehmenden (kalten) Seite des Wärmeübertragers und der damit verbundenen Verringerung der Umwandelbarkeit der Energie. Der exergetische Wirkungsgrad beträgt⁸⁷

$$\eta_{ex} \equiv \eta_{th} * \frac{(T_{m,w} - T_U) * T_{m,k}}{T_{m,w} * (T_{m,k} - T_U)}$$

Er wird wesentlich durch die Randbedingungen der Kopplung unterschiedlicher technischer Systeme vorgegeben und ist nur zum Teil durch die Konstruktion und Auslegung des Wärmeübertragers selbst beeinflussbar. Exergetische Wirkungsgrade von wenigen Prozent bis 99 % sind technisch möglich. Hier ergeben sich wesentliche Aufgabenstellungen für die Systemgestaltung im Sinne einer Energiekaskade.

Die Strömungsverluste im Wärmeübertrager sind eine weitere Quelle von Exergieverlusten. Die mit der Dissipation verbundenen Turbulenzen verbessern allerdings gleichzeitig den konvektiven Wärmeübergang und erlauben es, die Exergieverluste für die Temperaturdifferenz oder den Flächeneinsatz zu senken, so daß sich

⁸⁷ $T_{m,w}$ - Mitteltemperatur der Wärmeabgabe (warme Seite), $T_{m,k}$ - Mitteltemperatur der Wärmeaufnahme (kalte Seite)

ein Optimierungsproblem ergibt. Dieses läßt sich außerdem durch unterschiedliche Konstruktionsprinzipien und Strömungsführungen beeinflussen. Die Kopplung dieser Mechanismen mit komplexen Stoffübergangsmechanismen bei Kondensation und Verdampfung von Gemischen und die Modellierung der beeinflussbaren Mikroprozesse ist, insbesondere in Verbindung mit neuen Experimental- und Modellierungstechniken, ein bleibendes Aufgabenfeld der Grundlagenforschung in der Energie- und der Verfahrenstechnik.

2.3.6.1.3 Kompression

Etwa 5 % des gesamten Endenergiebedarfes der BRD werden in der Industrie für mechanische Energie eingesetzt. Davon entfällt ein beträchtlicher Teil auf Kompressions- und Verdichtungsprozesse. In der stoffwandelnden Industrie ist der Anteil noch höher. In Abbildung 2.3-11 ist zur Analyse der Verlustsituation ein typisches Flußbild für einen einstufigen Kompressor dargestellt, der Luft verdichtet und nach einer Nachkühlung mit Umgebungstemperatur an andere industrielle Systeme als Energieträger weitergibt. Unter den gegebenen Randbedingungen wird nur Elektroenergie zugeführt und in vollem Betrag im Kühler als Abwärme wieder abgeführt. Der Energiegehalt der Druckluft läßt sich nur durch die Exergie und nicht durch die Energie ausdrücken.⁸⁸

Die durch Reibung im Kompressor hervorgerufenen Exergieverluste äußern sich in einer Erwärmung des Gases, die nicht in entsprechendem Maße in mechanische Energie rückverwandelt werden kann. Diese Verluste liegen im allgemeinen in der Größenordnung von 15 bis 30 %. Ihre Verringerung ist durch neue Methoden der Strömungsberechnung für die Auslegung und Umsetzung der teilweise komplizierten Geometrien über numerisch gesteuerte Werkzeugmaschinen und moderne Methoden der Oberflächenbearbeitung Gegenstand der technischen Innovation.

Die Kompression wird i. a. adiabatisch durchgeführt, da es z. Z. technisch nicht möglich ist, gekühlte Kompressoren mit günstiger Strömungscharakteristik zu bauen. Die mit der Erwärmung verbundenen Volumenvergrößerung führt zu einer Vergrößerung der notwendigen Kompressionsarbeit, die durch mehrstufige Kompression mit Zwischenkühlung verringert wird (in den meisten Technologien ist die mit der Kompression gekoppelte Erhöhung der thermischen Energie nicht nutzbar). Die

⁸⁸ Falls der Bezugspunkt der Enthalpie für die Temperatur mit der Umgebungstemperatur übereinstimmt, wird nur ein durch den Druckeinfluß des realen Gases hervorgerufener geringfügiger Betrag nahe Null ausgewiesen, der in keinem Zusammenhang mit der technischen Arbeitsfähigkeit der Druckluft steht.

Wärmeabfuhr ist mit den bei der Wärmetübertragung üblichen Verlusten behaftet. Bei einer günstigen Auslegung und Vorhandensein von Wärmesenken ist eine Abwärmenutzung möglich.

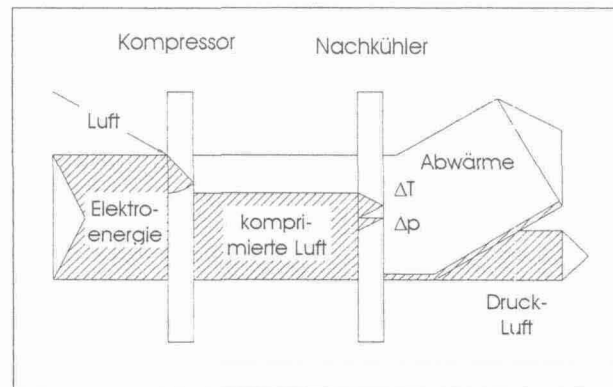


Abbildung 2.3-11

Energie- und Exergiefluß einer einstufigen Verdichtung mit Rückkühlung

Neben den funktionsbedingten Exergieverlusten treten i. a. noch einmal gleichrangige Verluste bei der Kopplung des Kompressors an den Verbraucher ein, soweit Fahrweisen bei wechselnder Last notwendig sind. Die konventionelle Kopplung wird durch eine Auslegung für Maximallast und eine Vernichtung der überschüssigen Exergie durch Drosselung oder Bypassfahrweise realisiert. Über mechanische oder elektrische Verstellungen im Kompressor oder seinem Antrieb (z. B. Flügelverstellung, Polumschaltung - bei großen Kompressoren konventionell, hydraulische Getriebe, Thyristorsteuerung) sind Anpassungen zwischen Kompressor- und Verbraucherkennlinie mit unterschiedlichem Nutzen und Aufwand möglich. Die Entwicklungen der Leistungselektronik zeigen dabei den z. Z. am meisten erfolgversprechenden Weg.

2.3.6.1.4 Entspannung und Drosselung

Die Entspannung in Arbeitsmaschinen dient der Umwandlung thermomechanischer Energie in mechanische Energie. Der maximal mögliche Arbeitsgewinn wird bei gegebenem Enddruck oder -temperatur erreicht, wenn die Entspannung ohne Wärmeabgabe und ohne Reibungsverluste erfolgt. Liegt dieser Zustand in der

Umgebung ist die maximale Arbeit gleich der Exergie. Verluste werden durch Reibungsverluste und insbesondere bei Kolbenmaschinen durch eine Reihe mit der Steuerung verbundene Verluste hervorgerufen. Exergetische Wirkungsgrade zwischen 70 und 90 % sind bei Turbinen technisch normal und auch vom Temperaturbereich der Entspannung abhängig.

Im Turbinenbereich haben sich durch neue Modellierungs- und Fertigungsmethoden Wirkungsgradentwicklungen ergeben, die vor wenigen Jahren noch als unerreichbar galten. Bei Verbrennungsmotoren versucht man durch neue mechanische und elektronische Lösungen bei der Steuerung entscheidende Wirkungsgradverbesserungen zu erreichen. Allerdings gilt das Problem einer optimalen Umwandlung in einem so weitem Leistungsbereich, wie er bei PKW-Motoren üblich ist, als so schwierig, daß einige Entwickler die Zukunft in Hybridmotoren sehen, bei denen bei etwa konstanter Leistungsabgabe Elektroenergie erzeugt, in Batterien zwischengespeichert und nach Bedarf über Elektromotoren abgegeben wird.

Die Drosselung ist ein Entspannungsprozeß ohne Arbeitsabgabe, also ein reiner Verlustprozeß in dem die Umwandelbarkeit der Energie verringert wird. Ihre Funktion besteht in der Anpassung der Druckparameter zu koppelnder technischer Systeme. Im flüssigen Zustandsbereich sind diese Verluste im Vergleich zu anderen Teilsystemen allerdings oft so gering, daß ein Ersatz durch Arbeitsmaschinen nicht als sinnvoll erscheint. Da sich bei der Entspannung nicht nur die Drücke, sondern auch Temperaturen ändern, erfordert ein Wechsel zwischen Drosselung und Entspannung in einer Arbeitsmaschine oft auch Eingriffe in das Wärmeübertragungssystem.

In der Kältetechnik wird die Drosselung durch den Joule-Thomson-Effekt als einfache Möglichkeit zur Kälteerzeugung eingesetzt. Exergetisch bedeutet das, daß der Druckanteil in einen thermischen Anteil der Exergie (allerdings bei hohen Verlusten) umgewandelt wird und der thermische Anteil über Wärmeübertragungsprozesse als Kälte nutzbar wird.

2.3.6.1.5. Umwandlung mechanischer oder elektrischer Energie

Bei der Umwandlung von mechanischer und elektrischer Energie ineinander fallen energetischer und exergetischer Wirkungsgrad zusammen. Die Verluste betragen i. a. nur wenige Prozent, können sich aber über die Umwandlungskette, z. B. Transformation und Transport elektrischer Energie, bis in den 10 %-Bereich addieren. Aus diesem Grunde kommt der Forschung und technischen Innovation zur Verringerung der Reibungs- und elektrischen Fortleitungs- und Umwandlungsverluste wesentliche energiewirtschaftliche Bedeutung zu.

Als Besonderheit tritt auf, daß die Temperatur der bei der Dissipation entstehende Wärme durch die Art der Ableitung bestimmt wird, die sich oft aus Werkstoff- und Sicherheitsanforderungen ergibt. Für die Abwärmenutzung bedeutet das, daß bei konzentriertem Auftreten dieser Verluste (z. B. Transformatorabwärme) eine Abwärmenutzung günstig erscheint.

2.3.6.2 Strategien zur Systemverbesserung

Technische Systeme sind aus Grundprozessen bzw. Anlagen und Ausrüstungen, die selbst schon eine Kombination von Grundprozessen darstellen, zusammengesetzt. Wie bereits dargelegt, wirken die Kopplungsbedingungen auf die Effektivität des Elements zurück. Bei der Gestaltung optimaler Systeme kommt es nicht nur darauf an, diese Kopplungsbedingungen zu definieren, sondern auch synergetische Effekte zu erschließen, was bedeutet, daß die Effektivität des Systems besser ist als seine Elemente erwarten lassen. Solche Effekte ergeben sich z. B., wenn Stoff- und Energiewandlung auf eine solche Art gekoppelt werden, daß Umwandlungsstufen wegfallen können oder eine unmittelbare Nutzung von Abenergien möglich wird. So können z. B. die Verdichter in einer Ammoniakanlage unmittelbar durch Abhitze-dampf, ohne daß man Elektroenergie benötigt, angetrieben werden.

Die Komplexität der Wechselwirkungen zwischen Stoffwandlung und Energiewandlung soll anhand eines Chemiebetriebes mit integrierter Energiewirtschaft veranschaulicht werden (Abbildung 2.3-12). In dem Bild sind drei Ebenen veranschaulicht, die thermodynamische Bilanzenebene mit Arbeit, Wärme, Stoff und Energie, die Ebene, die durch technischen Energiebegriffe gekennzeichnet ist, wie Exergie und Anergie, thermische Energie und chemische Energie und Verteilungsformen wie Dampf, Gase und Kälte und die Ebene der Wandlungsanlagen wie Feuerungen, Turbinen, Reaktoren und Kühler.

Im Energiesystem sind die unbeschränkt umwandelbaren Energieformen Brennstoff und Elektroenergie in Wärme, Elektro- bzw. Antriebsenergie und andere Energieträger umzuwandeln. Dabei führt über das Verteilungssystem (Netze) ein Pfad vom Brennstoff über die Wärme zur mechanischen Energie. Die Bereitstellung dieser Energieformen mit wenig Exergieverlusten erfordert eine Abarbeitung über eine Energiekaskade, die zum Schluß in der Umgebung endet. Der Produktionsprozeß umfaßt die energetische Aufwertung der Rohstoffe in Form von chemischer Energie und von Konzentrationsenergie über Reaktoren und Trenner. Diese Erhöhung des energetischen Niveaus der Produkte erfolgt am effektivsten in einer Stoffwandlungskaskade, die eine optimale Kopplung von Energiezufuhr und -abfuhr mit der Energiewandlungskaskade erlaubt.

Die Erfahrungen der Gestaltung technischer Systeme (die hier für einen Chemiebetrieb veranschaulicht wurden) lassen sich in Prinzipien und Regeln fassen.

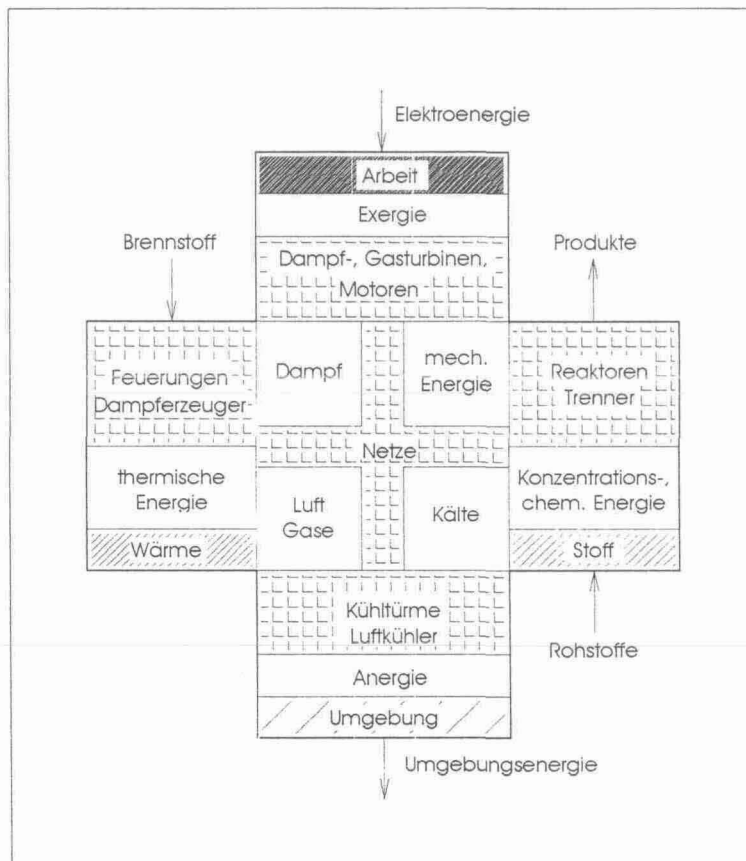


Abbildung 2.3-12

Wechselwirkung zwischen energie- und stoffwandelnden Systemen eines Chemiebetriebes

Ihre Anwendung erfordert neben technischem know-how, eine leistungsfähige Rechentechnik zur vorausschauenden Systemmodellierung und einen leistungsfähigen Maschinen- und Anlagenbau zur innovativen Umsetzung. Erfahrungen, die bei Anwendung dieser Methoden gemacht wurden, belegen, daß eine beträchtliche Entla-

stung der Umwelt und Energieeinsparung in der Industrie mit günstigem betriebswirtschaftlichen Effekt möglich ist. Solche Innovationen werden allerdings durch wirtschaftliche Rahmenbedingungen gefördert oder gehemmt.

Die thermodynamischen Prinzipien lassen sich durch die Begriffe „Energie- und Stoffwandlungskaskade“, Anpassung durch „Wärmetransformation“ und „Koppelproduktion“ und Verlustvermeidung durch „Recycling“ beschreiben.

Die verfahrenstechnischen Prinzipien bilden diese Sachverhalte auf einer anderen Ebene ab. Sie beinhalten zur Realisierung und Kopplung der Kaskaden die „Vielstufigkeit“ und das „Gegenstromprinzip“ und zum Erschließen synergetischer Effekte die „Kombination“ und „Integration“. Mit der Kombination verschiedener Anlagen und Verfahren an einem Standort können Umwandlungs-, Transport- und Speicherverluste gesenkt werden. Die Integration verschiedener Prozesse in einer Anlage erlaubt daneben oft die Einsparung von weiteren Umwandlungsstufen.

Das Optimierungsproblem ist i. a. nicht kausal-determiniert lösbar. Als methodische Hilfsmittel zur Erzielung einer guten Trefferquote bei Untersuchungen zur wirtschaftlichen Verbesserung der Ressourcennutzung dienen heuristische Regeln, Checklisten und Expertensysteme. Heuristische Regeln stützen sich auf positive Erfahrungen, aber auch auf die Randbedingungen, unter denen sie gemacht wurden, um die Suchrichtungen einzuschränken. Eine Verallgemeinerung dieser heuristischen Regeln mündet in Expertensysteme, deren Erstellung für stoffwandelnde Produktionsprozesse gegenwärtig eine Forschungsaufgabe ist.

In diesem Zusammenhang ist auch die „Pinch-Technologie“ zu sehen, die z. B. für Wärmenetze optimale Kopplungsbedingungen unter Beachtung von Systemengpässen ermittelt und gezielt zu beeinflussen gestattet. Es existieren bereits methodische Erweiterungen auf Stoffübergangsprozesse, die z. B. bei Waschprozessen den Wasserbedarf zu minimieren gestatten.⁸⁹

2.3.6.3 Techniken zur Energiebereitstellung

2.3.6.3.1 Kennzeichnung des Standes der Technik

Der gegenwärtige Stand der Energietechnik ist durch die Bereitstellung von Elektroenergie und Wärme über das Kondensationskraftwerk, die Wärmeerzeugung durch Verbrennung und die Kraft-Wärme-Kopplung geprägt. Die Prozesse wurden schon mehrfach beschrieben, so daß Abbildung 2.3-13 einen zusammenfassenden Vergleich darstellt. Der Fluß des kumulierten Primärenergieaufwandes ist als schraffiert begrenzter Hintergrund der Energie- bzw. Exergieströme gezeichnet.

Der E
W:

⁸⁹ Vgl. B. Linnhoff: Pinch analysis - a state-of-the-art overview.

⁹⁰ Die Proport

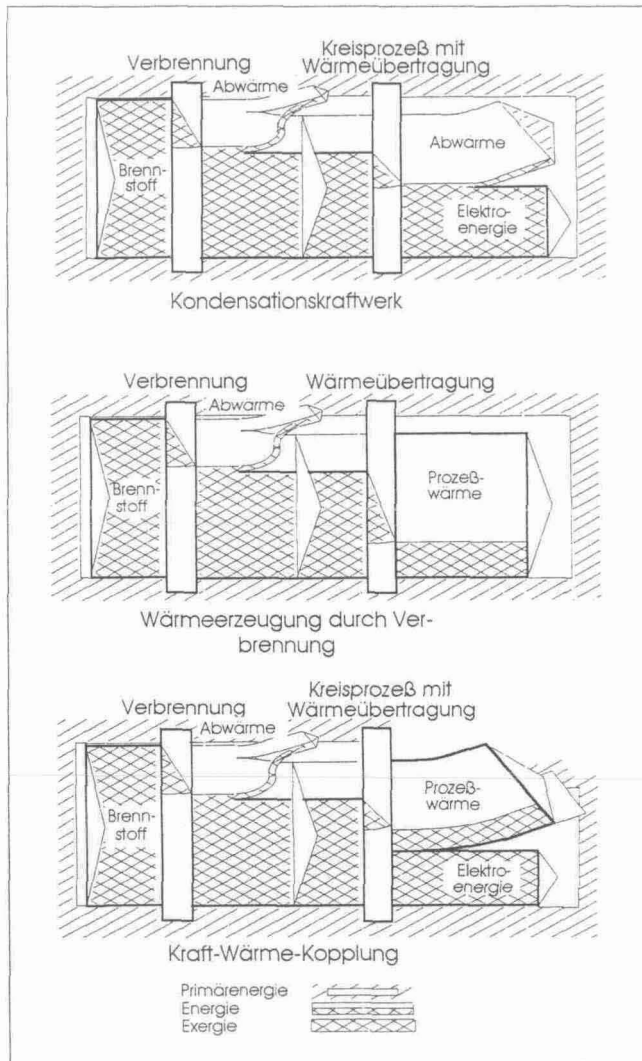


Abbildung 2.3-13

nergie-, Exergie- und Primärenergiefluß für Kondensationskraftwerk⁹⁰,
 ärmebereitstellung durch Verbrennung und Kraft-Wärme-Kopplung

ionen des Bildes widerspiegeln einen besseren, modernen Stand der Technik.

Abwärmeverluste des Kondensationskraftwerkes sind wegen der niedrigen Abwärmetemperatur nicht entscheidend. Die notwendige Wärmeabfuhr wird vor allem durch die Irreversibilitäten bei der Verbrennung, Wärmeübertragung und Entspannung hervorgerufen. Das Verhältnis zwischen abgegebener Exergie und Primärenergie ist etwa 1:3.

Die Wärmeerzeugung durch Verbrennung führt zu bedeutend höheren Exergieverlusten als bei der Energiewandlung im Kraftwerk. Je höher die Temperatur der benötigten Wärme ist, um so günstiger werden die Verhältnisse. Das Verhältnis der Nutzenergie zur eingesetzten Energie erscheint günstiger als beim Kondensationskraftwerk und liegt etwa bei 1:1,2. Bei Berücksichtigung der Umwandelbarkeit der Energie ergeben sich allerdings völlig andere exergetische Verhältnisse. Typisch für die Raumheizung ist ein Verhältnis von 1:10 und für die industrielle Prozeßwärme von 1:5.

Bei Anwendung der Kraft-Wärme-Kopplung ist Abwärme vermeidbar und das Nutzenergie-Primärenergie-Verhältnis ist etwa 1:1,2, unabhängig vom Mix und der Qualität der bereitgestellten Nutzenergien. Die Bewertung über die Umwandelbarkeit der gewonnenen Energie zeigt, daß sich die relativ günstigen Verhältnisse des Kondensationskraftwerkes von 1:3 für beide Nutzströme realisieren lassen. Rechnet man den Exergieaufwand für die Wärme in einen Energieaufwand um, so zeigt sich, daß das Energieverhältnis zwischen Heizwärme und Primärenergieaufwand bei Raumwärme etwa 1:0,3 und Prozeßwärme 1:0,7 beträgt.

Aus diesem Grunde ist es erstrebenswert die derzeitig dominierende Heizwärmebereitstellung über Heizkessel durch Kraft-Wärme-Kopplung oder andere Formen der reversiblen Wärmebereitstellung zu substituieren, wobei Verteilungs- und Kostengesichtspunkte zu Einschränkungen führen. Aus der Sicht der Energiebilanz ist gegen Kondensationskraftwerke nur einzuwenden, daß ihre Elektroenergieabgabe die mögliche Abgabe aus Kraft-Wärme-Kopplung auf dem Energiemarkt einschränkt.

In Abbildung 2.3-14 sind zwei Technologien zur annähernd reversiblen Wärme- bzw. Elektroenergiebereitstellung dargestellt. Die elektrische Wärmepumpe ist technisch ausgereift. Ihrer größeren Verbreitung stehen in der Bundesrepublik vor allem wirtschaftliche Probleme entgegen. Die Brennstoffzelle fand bisher in der Raumfahrt Anwendung. Pilotprojekte für BHKW und Fahrzeugantriebe in der Bundesrepublik bestätigen ihre technische Anwendbarkeit.

Das wirtschaftliche Potential ist zur Zeit nicht einschätzbar. In der Brennstoffzelle wird eine Wasserstoff-Sauerstoff-Oxidationsreaktion mit Elektronentransport durch ein Diaphragma realisiert. Dies erfordert eine wirtschaftliche Wasserstoffbereitstellung, wenn der Einsatz nicht auf spezielle Fälle beschränkt bleiben soll. Da eine photovoltaische Wasserstofferzeugung z. Z. als nicht realistisch erscheint, bleibt als wahrscheinlicher Einsatzfall die Verbindung mit einer Erdgaskonvertierung.

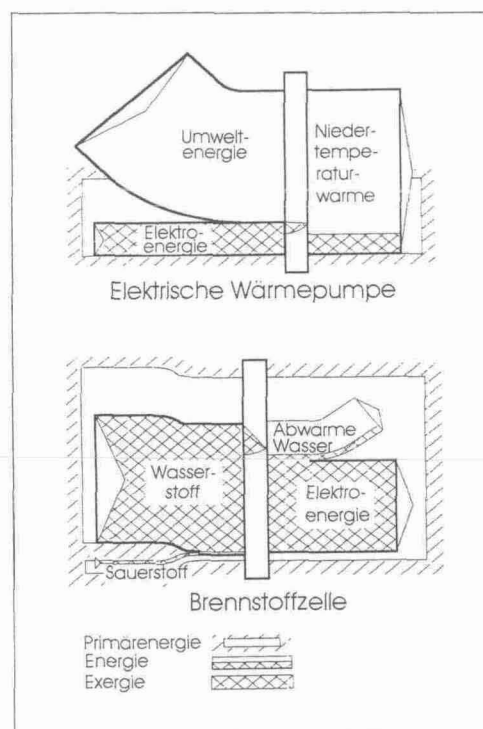


Abbildung 2.3-14

Der Energie-, Exergie- und Primärenergiefluß für eine elektrische Wärmepumpe und eine Brennstoffzelle

Die elektrische Wärmepumpe erreicht durch die Einbindung der Umgebungswärme ähnliche Exergieverhältnisse zwischen Nutzen und Primärenergie wie die Kraft-Wärme-Kopplung. Dabei ist ihre Einsetzbarkeit allerdings von einer Reihe von

Temperaturparametern abhängig und erfordert i. a. weiterreichende Eingriffe in das gesamte Heizsystem. Die auftretenden Exergieverluste von wenigstens 1/3 der eingesetzten Elektroenergie verschlechtern die Verhältnisse gegenüber der Kraft-Wärme-Kopplung. Damit ist ihr Einsatz aus energetischer Sicht nur vorteilhaft, wenn Wärmeverteilungsprobleme auftreten oder Elektroenergie besonders günstig bereitgestellt wird. Die motorgetriebene Wärmepumpe bzw. die Kopplung von BHKW und elektrischer Wärmepumpe ermöglicht die Entkopplung von Elektroenergie und Wärmeabgabe und Bereitstellung von Wärme auf energetisch relativ günstigem Weg. Probleme entstehen hier durch die hohen Investitionskosten.

Das Flußbild einer den heutigen Stand der Technik repräsentierenden Brennstoffzelle soll im Vergleich mit dem des Kondensationskraftwerkes verdeutlichen, daß die Brennstoffzelle durch die Wasserstoffherzeugung derart belastet wird, daß sie zwar besser als die heutigen Kraftwerke einzuschätzen ist, daß aber die modernen heutigen GuD-Kraftwerke ähnlich günstige Verhältnisse zwischen Elektroenergie und Primärenergieaufwand aufweisen.

	exergetischer Wirkungsgrad		Quelle
Dampfkomppressionsanlage	0,42 (Gütegrad)		A ⁹¹
Absorptionswärmepumpe	0,78 (Gütegrad)		A
Wärmetransformator	0,35 ... 0,55		A
Industrieofen	0,41		A
Heizkraftwerk	0,38		A
Wärmeübertrager	0,4 ... 0,8		A
Luftzerlegungsanlage	0,145		A
Heizkessel (Öl, Gas befeuert)	0,07 ... 0,25	(0,75)*	B ⁹²
Brennwertkessel (Öl, Gas befeuert)	0,09 ... 0,3	(0,95)*	B
Industrieofen (Kohle, Öl, Gas befeuert)	0,15 ... 0,4	(0,60)*	B
Fernwärme	0,3	(0,85)*	B
Nahwärme	0,3	(0,90)*	B
Elektrospeicherheizung	0,04	(0,40)*	B
Klimaanlage	0,01 ... 0,05		A

Tabelle 2.3-11

Wirkungsgrad von Energieumwandlungssystemen
(* energetische Primärangabe)

⁹¹ W. Fratzscher et al.: Exergie - Theorie und Anwendung.

⁹² K. Heinloth: Energie und Umwelt - Klimaverträgliche Nutzung von Energie.

Die Tabelle 2.3-11 illustriert beispielhaft die Verlustsituation bzw. die Wirkungsgrade vom Brennstoff bis zur Nutzenergiebereitstellung bzw. bei den Wärmetransformationsprozessen vom Energie-Input bis zum Output. Die Werte der Wärmetransformationsprozesse zeigen im Zusammenhang mit der Realisierung einer Energiewandlungskaskade die technischen Schwierigkeiten und das noch vorhandene Entwicklungspotential. Die Verluste sind so hoch, daß ihr Einsatz zur Prozeßanpassung kaum erfolgversprechend ist. Ihr Einsatz beschränkt sich z. Z. auf die Nutzbarmachung sonst nicht nutzbarer Abwärmen.

Die Verhältnisse bei der Wärme- und Elektroenergiebereitstellung wurden bereits grundsätzlich erläutert. Die Zahlenbereiche für die Wärmebereitstellung entsprechen typischen unteren und oberen Temperaturen, für die diese Prozesse eingesetzt werden. Bei hohen Nutzwärmetemperaturen ist eine Kraft-Wärme-Kopplung wegen der erhöhten apparativen Aufwendungen nicht aussichtsreich. Die elektrische Raumheizung wird als einfachste Form der Energieverschwendung klassifiziert. Sie hat nur unter relativ engen Randbedingungen eine volkswirtschaftliche Berechtigung.

Die Luftzerlegungsanlage verdeutlicht den hohen energetischen Aufwand für die Stofftrennung. Die Stoffwandlungsprozesse bedürfen einer besonders diffizilen Analyse. Exergetische Wirkungsgrade von wenigen Prozent, die i. a. die Suche nach anderen Wirkprinzipien als aussichtsreich anzeigen, bis zu Werten nahe Eins sind durchaus üblich.

Die Werte für die Klimaanlage belegen den i. a. hohen Klimatisierungsaufwand. Der Wert ist dabei extrem von den Wetterbedingungen abhängig. Vollklimatisierung sollte unter den klimatischen Bedingungen der BRD auf notwendige Einsatzfälle beschränkt bleiben.

In der Tabelle 2.3-12 wird der fortgeschrittene Stand der Technik dargestellt. Die Daten belegen, daß durch die schon erörterten Maßnahmen auch im konventionellen Kraftwerksbereich Effektivitätssteigerungen möglich waren, wie sie noch vor wenigen Jahren als nicht erreichbar erachtet wurden.⁹³ Das erstangeführte Kohlekraftwerk kann als Bezugsbasis für den noch vor wenigen Jahren als Bestwert angesehenen Stand dienen. Sogar Braunkohlekraftwerke können einen Wirkungsgrad von 40% überschreiten. Dies wurde durch Anlagenoptimierung und Einsatz moderner Vergasungstechnologien in Verbindung mit Gasturbinen möglich. Etwa 50% der Kraftwerksneubauten haben mittlerweile einen kombinierten Gasturbinen-Dampfkraft-Prozeß, wobei Wirkungsgrade von 55% noch nicht als normal gelten, da sie mit entsprechend aufwendigen Anlagen und hohen Investitionen verbunden sind.

⁹³ Vgl. Kohlekraftwerke der Zukunft.

⁹⁴ Vgl. VDI-Bericht: Solarthermische Kraftwerke II.

	Brennstoff	η	P	ϵ_{CO_2}	τ	ι	κ	ϕ	Qu.
Kraftwerk (Kohlestaubfeuerung)	Steinkohle	41		817	40	2000... 2400			C ⁹⁵
Kombikraftwerk (Erdgas - Steinkohle)	GT: Erdgas DE: 30 % Erdgas 70 % Steinkohle	44		624		2000... 2600			C
GuD-Kraftwerk	Erdgas	55		381		1200... 1400			C
GuD-Kraftwerk (Steinkohle)	Steinkohle	44		761		2000... 3000			C
KoBra-Kombikraftw. (Rauchgasentschwefelg.)	Braunkohle	45	GT: 200 DT: 160						D ⁹⁶
Kernkraftwerk (Leichtwasserreaktor)	Uran	32	1300		40	3850	11	7	E ⁹⁷ , B
Kernkraftwerk (Hochtemperaturreaktor)	Uran	50	200						B
BHKW (motorisch betrieben)	Diesel	47	0,1... 5		10	2500		6	B, F ⁹⁸
Wasserkraftwerk	-	90	> 1000						B
Windkraftwerk (Deutsche Küste)	-	40	0,3		20	1200... 2250	7,5... 15		E, G ⁹⁹
Solarzellenanlage (Silizium, Deutschland)	-	10	0,3		30	3500	200	4	E, B
Solarthermisches Rinnen-Kraftwerk	-	30				6750		3	B, H ¹⁰⁰
Biogas-Kraftwerk	Biogas	50						3	B
Wasserstoffherzeug. (Elektrolyse)		70				150... 2400	0,75... 6 ¹⁰¹	4	B, H
Brennstoffzellen- BHKW	Erdgas	el:40 th:45 Σ : 85	0,2			5000			F, H

Tabelle 2.3-12

Kennzahlen für Energiewandlungssysteme.

η - energetischer Wirkungsgrad in %, P - elektr. Leistung in MW, ϵ_{CO_2} - spezifische CO_2 -Emission in g_{CO_2} / kWh , τ - Lebensdauer in a, ι - spez. Investitionskosten in DM / KW, κ - spezifische Energiekosten in Pf / kWh, ϕ - Erntefaktor, Qu - Quellen (A, B s. Tabelle 2.3-11).

⁹⁵ U. Fahl et al.: Möglichkeiten der CO_2 -Emissionsminderung in der Elektroenergieerzeugung Baden-Württembergs.

⁹⁶ T. Klante: KoBra-Kombikraftwerk für Braunkohle.

⁹⁷ E. Roth: Energetischer Vergleich von Kraftwerken.

⁹⁸ M. Seidel: Motorisch betriebene Blockheizkraftwerke.

⁹⁹ W. Rasch: Sonnenenergienutzung - Daten und Fakten auf der Schwelle zum Markt.

¹⁰⁰ H. Knappstein: Blockheizkraftwerk mit Brennstoffzellen.

¹⁰¹ Zusätzliche Wandlungskosten.

Die Windenergienutzung kann zwar fossile Brennstoffe nur in begrenztem Maße substituieren, erlaubt aber unter günstigen Bedingungen eine wirtschaftliche Energieerzeugung. Die photovoltaische Nutzung der Solarenergie ist etwa um eine Zehnerpotenz außerhalb des wirtschaftlichen Bereiches. Solarthermische Kraftwerke erscheinen bereits günstiger. Sie werden i. a. mit erdgasbefeuerten Kraftwerken kombiniert, weshalb ihre Wirtschaftlichkeit nicht getrennt ausgewiesen wird. Sie ist z. Z. nur unter bestimmten Randbedingungen akzeptabel. Dabei sei darauf hingewiesen, daß für die Solarenergienutzung zur Elektroenergieerzeugung die Standortbedingungen eine entscheidende Rolle spielen. Sie sind z. B. im Mittelmeerraum 2 bis 4mal günstiger als in Deutschland.¹⁰²

2.3.6.3.2 Optionen zur Verbesserung der Energiebereitstellung

Eine Reihe neuer Techniken für die Energieversorgung befindet sich in einer Forschungs- und Entwicklungsphase, die in den nächsten Jahren oder Jahrzehnten eine Verbesserung der Effektivität erwarten läßt.

Die Wirbelschichtfeuerung gestattet in verschiedenen Varianten eine effektive Gestaltung des Verbrennungsprozesses für feste Brennstoffe und eine Beeinflussung des Schadstoffausstoßes u. a. durch Einbindung in die Rückstände. Sie erhält in neuerer Zeit Konkurrenz durch die Kohlevergasung, weil diese eine günstige Kopplung des Kohleinsatzes mit Gasturbinenprozessen und eine leichtere Realisierung von GuD-Kraftwerken ermöglicht. Die Kohledruckvergasung erleichtert dabei den Einsatz von Gasreinigungsverfahren und die Durchführung einer schadstoffarmen Verbrennung zur Bereitstellung des heißen Gases für die Gasturbine. Die Kombination von Gasturbinen- und Dampfkraftprozeß entspricht mittlerweile dem fortgeschrittenen Stand der Technik und hat bei Neuinvestitionen einen zunehmenden Anteil.

Die Kernkraftwerke der westlichen Industrieländer gelten als technisch sicher. Dieser Sachverhalt stimmt nicht mit dem sozialen Sicherheitsempfinden der unterschiedlichen Interessengruppen überein. Probabilistische Risikountersuchungen an Kernkraftwerken stoßen auf die Schwierigkeit, daß sie Ereignisse mit sehr geringer Wahrscheinlichkeit mit teilweise gravierenden, von der Gesellschaft nicht akzeptierten Folgen miteinander verknüpfen müssen. Außerdem sind die komplexen, möglichen Ereignisbäume nur in ihrer Grundstruktur und nicht vollständig abbildbar. Deshalb sind die quantitativen Ergebnisse solcher Risikoanalysen etwa um eine Zehnerpotenz unsicher. Sie weisen Kernkraftwerke aber als sehr sichere Technologie unter den komplexen Technologien der Energie- und

¹⁰² Vgl. VDI-Bericht: Solarthermische Kraftwerke II.

Stoffwandlung aus, wobei darauf hinzuweisen ist, daß der Stand der Sicherheitsforschung in anderen Bereichen noch nicht als soweit fortgeschritten wie in der Kerntechnik eingeschätzt wird.¹⁰³ Die Störfalluntersuchungen an Kernkraftwerken haben in den westlichen Industrieländern zu Nach- und Umrüstungen an bestehenden Kraftwerken geführt, die den Sicherheitsstandard erhöht haben.¹⁰⁴ Für moderne Entwicklungen gilt die Forderung, den größten anzunehmenden Unfall (GAU) nicht nur mit einer sehr geringen Wahrscheinlichkeit zu belegen, sondern ihn durch technologische Änderungen entweder sicher zu beherrschen oder ganz auszuschließen. Ob und wann die in Entwicklung befindlichen Projekte eingesetzt werden, ist im wesentlichen von politischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen abhängig. Die aus dem wirtschaftlichen und dem Ressourcenbereich rührenden Indikatoren scheinen indifferent bezüglich der Kernenergienutzung durch thermische Reaktoren im Vergleich mit anderen Vermögensenergien. Ein nicht zu unterschätzendes Argument für die Kernenergienutzung rührt daher aus der vergleichsweise umweltschonen Energiebereitstellung.

Die Bewertung der Kernenergienutzung erfordert eine Betrachtung des Brennstoffkreislaufes und der Endlagerung nicht weiter verwertbarer radioaktiver Abfälle.¹⁰⁵ Das Problem möglicher katastrophaler Störfälle wird bei der Verarbeitung radioaktiver Brennstoffe von verfahrenstechnischen Problemen bei der Stofftrennung und damit verbundenen radioaktive Emissionen bzw. Rückständen und deren Behandlung überlagert. Für die Endlagerung tritt außerdem das Problem des Planens in für die Menschheit ungewohnten Zeiträumen von Jahrtausenden ein. Nach dem Eintritt der Menschheit in die Kernenergienutzung ist die Lösung der damit verbundenen Probleme unabdingbar. Eine Erschwerung der Problemlösung durch gesellschaftliche Randbedingungen behindert nicht nur die zukünftige Entwicklung der Kernenergie sondern auch die Lösung gegenwärtig anstehender technologischer Aufgaben. Die in Japan beginnende Grundlagenforschung zur nuklearen Konvertierung ist eine konsequente Entwicklung zur Ergänzung der durch die Stoffwandlung gegebenen Möglichkeiten im Brennstoffkreislauf durch solche der Kernumwandlung. Die Entwicklung in Richtung Brutreaktor, die gleichfalls nur in Japan technologisch mit einem Prototyp weiterverfolgt wird, gibt gleichfalls die Möglichkeit des gezielten Eingriffes in den Brennstoffkreislauf. Bei Lösung der angeschnittenen Probleme (als Zeithorizont werden Jahrzehnte erwartet) könnte die

¹⁰³ Vgl. U. Hauptmanns et al.: Technische Risiken - Ermittlung und Beurteilung.

¹⁰⁴ Vgl. Öko-Institut Freiburg: Die Risiken der Atomkraftwerke - der Anti-Rasmussen-Report der Union of Concerned Scientists und Gesellschaft für Reaktorsicherheit: Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke - Phase B.

¹⁰⁵ Vgl. C. Keller, H. Möllinger: Kernbrennstoffkreislauf. Bd. 1, Allgemeine Aspekte, Versorgung von Kernkraftwerken, B. Fischer et al.: Der Atom Müll Report und K. Kugeler, R. Schulten: Hochtemperaturreakorteknik.

Nutzung der Kernspaltung als Zukunftstechnologie erscheinen. Sie hätte damit das Potential eines wesentlichen Bausteins zur grundsätzlichen Lösung der Energie- und Umweltprobleme. Die Nutzung der Kernfusion könnte ein ähnliches Potential bei Senkung der radioaktiven Risiken bereitstellen. Sie befindet sich allerdings noch soweit im Stadium der Grundlagenforschung, daß die Vorhersage ihres Einsatzes und der Zeithorizonte zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht möglich erscheint.

Die Brennstoffzelle befindet sich noch in der Phase der Grundlagenforschung und der ersten Demonstrationsanwendungen. Sie läßt durch Vermeiden der Verbrennung wesentliche Wirkungsgradverbesserungen erwarten. Die Unterscheidung der verschiedenen Brennstoffzellentypen ist mit Temperaturunterschieden im Arbeitsbereich und unterschiedlicher Einbindung in Wärmenetze verbunden.¹⁰⁶ Von dieser Einbindung wird ihre Effektivität mit beeinflusst. Demonstrationsbeispiele bestehen oder sind vorgesehen bei BHKW und Fahrzeugantrieben. Sie lassen exergetische Wirkungsgrade von etwa 70 % erwarten. Ihr wirtschaftlicher Einsatz ist wesentlich von der Technologie zur Wasserstoffbereitstellung abhängig. Aus heutiger Sicht scheint eine Bereitstellung aus Erdgas über integrierte Konvertierung aussichtsreich. Hochtemperaturbrennstoffzellen lassen in Verbindung mit konventionellen Kreisprozessen exergetische Wirkungsgrade von 99 % als theoretisch möglich erscheinen.¹⁰⁷ Sie befinden sich allerdings erst am Anfang der technischen Grundlagenforschung.

Für die Nutzung von Einkommensenergien stehen als neue Technologien Windkonverter, Solarmodule zur Warmwasserbereitstellung, Technologien zur Nutzung nachwachsender Rohstoffe, Technologien zur Nutzung geothermischer Energie, solarthermische Kraftwerke und photovoltaische Kraftwerke zur Verfügung. Die Reihenfolge entspricht ihrer derzeitigen Wirtschaftlichkeit und Einsatzbreite.

Die Nutzung der Wasserkraft erscheint aber für das nächste Jahrzehnt aufgrund der regionalen Verteilung der nutzbaren Potentiale und ihrer Wirtschaftlichkeit die dominierende Einkommensenergiequelle zu bleiben.¹⁰⁸

¹⁰⁶ Vgl. E. F. Schmidt: Unkonventionelle Energiewandler und H. Wendt, V. Plzak: Brennstoffzellen, Stand der Technik, Entwicklungslinien, Marktchancen.

¹⁰⁷ Vgl. S. Münzberg: Kumulierter Exergieaufwand für moderne Energiewandlungstechnologien.

¹⁰⁸ Vgl. Praxis solar- und windelektrischer Energieversorgung; H. L. von Cube: Handbuch der Energiespartechniken, Bd. 3 Nutzung regenerativer Energien und passiver Spartechnik; G. C. Goy: Erneuerbare Energiequellen - Abschätzung des Potentials in der Bundesrepublik Deutschland bis zum Jahr 2000; H. Schaefer: Nutzung regenerativer Energiequellen - Zusammenstellung von Daten und Fakten für die Bundesrepublik Deutschland; M. Kleemann, M. Meliß: Regenerative Energiequellen; S. Karamanolis: Sonnenenergie - Ausweg aus dem Öko-Energie-Dilemma; H. F. Mataré, P. Faber: Erneuerbare Energien - Erzeugung, Speicherung, Einsatzmöglichkeiten; F. Rummel, O. Kappelmeyer: Erdwärme - Energieträger der Zukunft? Fakten - Forschung - Zukunft;

Die Windkonverter scheinen unter den wirtschaftlichen Rahmenbedingungen von Deutschland die Pionierphase zu überwinden. Die technische Entwicklung ist durch wachsende Einheitsleistung, Wirtschaftlichkeit, Zuverlässigkeit und Verbesserung der Betriebsführung gekennzeichnet.¹⁰⁹

Die solarthermische Warmwasserbereitstellung befindet sich in der Pionierphase und ist in Deutschland z. Z. nur unter bestimmten Randbedingungen wirtschaftlich (z. B. Ersatz elektrischer Heizung). Die unterschiedlichen Systeme sind durch unterschiedliche Wirkungsgrade, unterschiedliche Nutztemperaturniveaus und Unterschiede in der Betriebsführung gekennzeichnet.¹¹⁰

Die Erkundung und Nutzung geothermischer Energie zur Heißwasserbereitstellung befindet sich in Deutschland in der Pionierphase, hat aber nur regionale Bedeutung. Solarthermische Kraftwerke unterscheiden sich im wesentlichen bei der Wärmebereitstellung von konventionellen Kraftwerken. Dabei gibt es unterschiedliche Receiverkonstruktionen und Einbindungen in die thermischen Kreisläufe, die sich hinsichtlich des technischen Aufwandes, der erreichbaren Wirkungsgrade und Kosten unterscheiden. Zur bedarfsgerechten Energiebereitstellung hat sich eine Kopplung mit Erdgaseinsatz bewährt, die Kostenvorteile gegenüber dem Einsatz von Speicherprozessen hat. Der Erdgaseinsatz gleicht auch die z. Z. negative betriebswirtschaftliche Bilanz der Sonnenenergienutzung aus. Pionierprojekte mit wechselndem wirtschaftlichen Erfolg (bei wechselnden Rahmenbedingungen) befinden sich in Gebieten mit günstiger Sonneneinstrahlung (Kalifornien) und Experimentalprojekte der EU in Südspanien. Untersuchungen innerhalb der EU haben gezeigt, daß der Mittelmeerraum für diese Kraftwerke unter bestimmten Randbedingungen des Energieversorgungssystems geeignet erscheint.¹¹¹

Die Photovoltaik erscheint als einfache und elegante Variante der dezentralen Bereitstellung elektrischer Energie. Sie ist heute in den Fällen wirtschaftlich, in denen sonst extreme Energieverteilungskosten anfallen würden, also in nicht-vernetzten Gebieten und bei der Versorgung isolierter oder portabler Verbraucher mit geringem Energiebedarf. In anderen Fällen liegen ihrer Kosten heute um den Faktor 6 bis 10 über den Netzbezugskosten, so daß man trotz des „1000 Dächer Programms“ der Bundesrepublik und Einsatz an exponierter Stelle in Unternehmen nur von Demonstrations- und Experimentalanlagen sprechen kann. Entwicklungen in der Halbleitertechnik in Richtung höherer Wirkungsgrade, neuer Pro-

Energieeinsparung und erneuerbare Energien - Berichte aus den energiepolitischen Gesprächszirkeln beim Bundesministerium für Wirtschaft.

¹⁰⁹ Vgl. VDI-Statusbericht Windenergie, S. Heier: Nutzung der Windenergie - Ein Informationspaket, J.-P. Molly: Windenergie - Theorie, Anwendung, Messung.

¹¹⁰ Vgl. Bericht der Bundesregierung: Energie - Forschung und Technik. Nutzung der Solartechnik für die Niedertemperatur- Wärmeversorgung.

¹¹¹ Vgl. H. Klaiß, F. Staiß: Solarthermische Kraftwerke für den Mittelmeerraum.

duktionsverfahren und neuer Photozellentypen könnten allerdings zu einer entscheidenden Kostensenkung für Photomodule im nächsten Jahrzehnt führen. Bei einem vollständigen Einsatz von Photovoltaik als ausschließlichen Energieträger sind neben der notwendigen Flächenbereitstellung in der Bedeutung gleichwertige Probleme bei Speicherung und Verteilung zu lösen, so daß mindestens für Jahrzehnte mit einem Energiemix zu rechnen wäre.¹¹²

Mit der Nutzung nachwachsender Rohstoffe entwickeln sich neue Technologien zur Energiewandlung. Die Nutzung von Rapsöl als Biodiesel erfordert z. B. eine Veresterungstechnologie. Außerdem ist eine innovative Anpassung der Brennstoffmotoren und des Treibstoffsystems erforderlich. Die Verbrennung von Stroh oder Holz in umweltfreundlichen Anlagen erfordert besondere Feuerungstechnologien. Die Umweltfreundlichkeit wird aus der mit Stoffkreisläufen verbundenen Sonnenenergienutzung begründet. Die Wirtschaftlichkeit hängt wesentlich von den Randbedingungen in Land- und Forstwirtschaft ab. Die Nutzung ist in Deutschland als Pioniertechnologie mit von der Landwirtschaft abhängender, regionaler Bedeutung zu kennzeichnen.

Mit der Nutzung von witterungs- und tageszeitlich bedingt anfallenden Einkommensenergien und dem Versuch der regionalen Vermeidung von Emissionen nimmt die Bedeutung von neuen Speicher- und Transportsystemen zu.¹¹³

Für den Ersatz von Verbrennungsmotoren in Fahrzeugen durch Elektromotoren spielen Innovationen und Entwicklungen neuer elektrochemischer Akkumulatoren eine entscheidende Rolle. Die sehr verschiedenen Entwicklungen haben bei unterschiedlichen Anwendungen unterschiedliche energetische und wirtschaftliche Vorteile. Im wesentlichen konzentrieren sich die Anwendungen im Verkehrswesen auf Demonstrationsfahrzeuge und Feldversuche, da sie z. Z. nur für besondere Einsatzfälle sowohl den Nutzungs- als auch wirtschaftlichen Anforderungen genügen. Bei Änderung von Randbedingungen (z. B. Einsatzverboten für Verbrennungsmotoren in bestimmten Gebieten oder zu bestimmten Zeiten oder gesetzlichen Anforderungen an die Fahrzeugindustrie) könnte sich die Situation binnen weniger Jahre ändern. Mit dem Hybridantrieb ist ein alternierend eingesetzter Verbrennungsmotor zum Elektromotor vorhanden, oder der Verbrennungsmotor

¹¹² Vgl. H. Lippold et al.: Solartechnik - Thermische und fotoelektrische Nutzung der Solarenergie, K. Köthe: Stromversorgung mit Solarzellen - Methoden und Anlagen für die Energieaufbereitung, F. Raudszus et al.: Das Solarenergie Buch, Technologie der Photovoltaik - Eine EUROSOLAR-Studie, D. Meissner: Solarzellen - Physikalische Grundlagen und Anwendung in der Photovoltaik, J. Schmid: Photovoltaik - Strom aus der Sonne - Technologie, Wirtschaftlichkeit und Marktentwicklung, H.-G. Wagemann, H. Eschrich: Grundlagen der photovoltaischen Energiewandlung und A. Wagner: Technisch-wirtschaftliche Bewertung photovoltaischer Stromversorgungs-Systeme.

¹¹³ S. a. VDI-Bericht: Energiespeicher für Strom, Wärme und Kälte.

liefert mit besserem Wirkungsgrad den durchschnittlichen Leistungsbedarf, während der elektrische Antrieb in Verbindung mit einer elektrochemischen Akkumulatorpufferung den tatsächlichen Leistungsbedarf deckt. Diese Systeme sind bisher auf Experimental- und Demonstrationsfahrzeuge beschränkt. Im Zusammenhang mit Fahrzeugen spielen auch kinetische Schwungradspeicher als ergänzendes Moment eine Rolle. In speziellen Fahrzeugen (z. B. Schienenfahrzeugen) sind sie als Pioniertechnik anzutreffen.

Die Wasserstofftechnik wird zur Verteilung und Speicherung in einer mit kohlenstofffreien Energien betriebenen Energiewirtschaft favorisiert. Der Vorteil gegenüber der Elektroenergie besteht in der guten Speicherbarkeit der chemischen Energie. Die erzielbare hohe Energiedichte ermöglicht auch einen mobilen Einsatz. Die energetische Anwendung kann wie bei anderen Brennstoffen erfolgen, wobei durch den Wasserkreislauf über Wasserstoff ein Treibhauseffekt vermieden wird.¹¹⁴ Im allgemeinen wird eine Wasserstoffwirtschaft durch eine auf der Basis von Kernenergie oder Solarenergie basierende Energiewirtschaft motiviert. Die beste energetische Nutzung ist durch die Brennstoffzelle gegeben. In einem breiten Bereich der Energiewandlung von der Wasserstofferzeugung aus Solarenergie, über Einsatz in Feuerungen, Flugzeugtriebwerken, Verbrennungsmotoren bis zur Brennstoffzelle existieren Experimental- und Demonstrationsprojekte. Es zeigt sich auch, daß bis zum breiten Einsatz noch eine Reihe technischer Probleme innovativ zu lösen sind (z. B. Betankungseinrichtungen für Wasserstoff). Der breite und wirtschaftliche Einsatz wird allerdings sehr wesentlich vom realisierten Primärenergiemix abhängig sein und ist deshalb in näherer Zukunft nicht zu erwarten.¹¹⁵

Als modernste und am schwersten in der weiteren Entwicklung einzuschätzende Option für Transport und Speicherung erscheint die Nutzung der Supraleitung. Hier befindet man sich bei der Grundlagenforschung vor allem auf der Suche nach Supraleitern, die schon bei relativ hohen Temperaturen (z. B. Siedetemperatur von flüssigem Stickstoff) supraleitend werden. Damit ergeben sich völlig neue Möglichkeiten für einen von elektrischen Verlusten freien Transport und die Realisierung elektromagnetischer Energiespeicher. Verluste entstehen allerdings bei der Kältebereitstellung und können verschiedene Anwendungsfälle nicht nur aus wirtschaftlicher sondern auch aus energetischer Sicht ausschließen. Zur Zeit sind

¹¹⁴ Vgl. U. Bastiansen: Der Energieträger der Zukunft Wasserstoff statt Kernkraft, Kohle und Benzin.

¹¹⁵ Vgl. C.-J. Winter, J. Nitsch: Wasserstoff als Energieträger - Technik, Systeme, Wirtschaft, J. O'M Bockris, E. W. Justi: Wasserstoff - Energie für alle Zukunft - Konzept einer Sonnen-Wasserstoff-Wirtschaft, K. Ledjeff: Neue Wasserstofftechnologien - Konkrete Nutzung unter Wasser, auf der Erde, im Weltall und VDI, Universität Stuttgart: Wasserstoff als Energieträger - Arbeits- und Ergebnisbericht.

Pionieranwendungen in der Meßtechnik und Schalttechnik durch einige spezialisierte Firmen bekannt geworden. Ein großtechnischer Durchbruch wird in den nächsten zehn Jahren nicht erwartet.

Neben der Entwicklung neuer Techniken und Technologien sind auch Innovationen konventioneller Techniken und Technologien in bezug auf Wirkungsgrade, Emissionen und Wirtschaftlichkeit zu beobachten, die eine neue Qualität darstellen. Schwerpunkte bilden dabei die Optimierung der Verbrennung, der Wärmeübertragung und der Gestaltung des Gesamtsystems, verbunden mit neuen Automatisierungskonzepten. Beispiele hierfür sind die optimierte Kraftwerkstechnik, wo als Schwerpunkt noch die Turbinenoptimierung hinzukommt, und moderne Brennwertkessel.

Die Entwicklung der Motorentechnik, insbesondere der Einsatz von Gasmotoren, ermöglichte den Aufbau einer dezentralen Energieversorgung bei örtlichen Energieversorgungsunternehmen oder die Versorgung von Gebäudekomplexen durch BHKW.¹¹⁶ Durch Kombination mit einem Wärmepumpenprozeß kann in Gebäudekomplexen eine Entkopplung vom Elektroenergieversorger stattfinden. Mit einer möglicherweise zusätzlichen Ausstattung der Luftkonditionierung durch regenerative Systeme kann so eine energetisch effektive Gebäudeklimatisierung aufgebaut werden.

Weitere Möglichkeiten der Effektivitätserhöhung ergeben sich durch Einsatz der Leistungselektronik und moderner Systeme der Automatisierung bzw. Informationsverarbeitung. Mit der Leistungselektronik ist eine Anpassung elektrischer Parameter möglich, die oft erst eine Kopplung dezentraler Energieerzeuger an das zentrale Netz erlaubt. Außerdem ist eine nahezu verlustlose Beleuchtungs- oder Motorsteuerung erreichbar.

Durch den modernen Stand der industriellen Informationstechnik ergeben sich neue Möglichkeiten der Steuer- und Leittechnik und der Realisierung von Automatisierungsalgorithmen. Die realisierbare Zustandsdiagnostik ermöglicht neue Instandhaltungs- und Wartungszyklen.

Mit den neuen Möglichkeiten der digitalen Meßtechnik, verbunden mit der Datenübertragung, wird ein völlig neues Preis- und Tarifsysteem für Elektroenergie¹¹⁷, besonders unter Beachtung dezentraler Energieeinspeiser, technisch realisierbar. Ein relativ freier Energiemarkt auf dieser Datenautobahn wäre machbar. Allerdings müßten sich erst die entsprechenden verteilten Kapazitäten auf der Energieerzeugerseite entwickeln.

¹¹⁶ Vgl. Fachinformationszentrum Karlsruhe: Blockheizkraftwerke; Kommunale Energieversorgung, Energiekonzepte, Nah- und Fernwärme, energetische Nutzung von Abfall - Informationspakete.

¹¹⁷ Vgl. G. Rössle: Das MAREN-Modell, Perspektiven einer Energiezukunft.

2.3.6.4 Technische Optionen zur Senkung des Energiebedarfs

Bei der Energieanwendung, als der eigentlichen Energiedienstleistung, ist die technologische Vielfalt im industriellen Bereich so groß, daß keine allgemeine Einschätzung der Wirtschaftlichkeit möglich ist. Gewöhnlich gibt es eine Reihe wirtschaftlich sinnvoller Referenzvarianten, über deren Umsetzung in andere Bereiche anhand der konkreten Randbedingungen zu entscheiden ist.¹¹⁸

Der Energiebedarf im Sanitär- und Raumwärmebereich kann mit relativ einfachen technischen Mitteln beeinflußt werden. Der Grundbedarf wird durch das Baukonzept und die Architektur maßgeblich vorgegeben. Der spezifische Wärmebedarf nimmt vom kompakten Gebäude in Richtung Einzelbebauung tendenziell zu. Die Nutzung der Sonnenenergie zur Erwärmung des Hauses wird z. B. durch seine Ausrichtung und die Einordnung von Glasflächen maßgeblich beeinflußt. Durch eine Verbesserung der Isolierung im Außenbereich der Gebäude läßt sich der Wärmebedarf soweit senken, daß er im Prinzip durch innere Wärmequellen gedeckt werden kann und der Lüftungsbedarf zur entscheidenden Größe wird. Mit der Konzipierung der Heizungssysteme (z. B. Fußbodenheizung, Strahlungsheizung) verändert sich das subjektive Temperaturempfinden und sind moderne Heizsysteme (Wärmepumpen, Solarenergienutzung, Brennwertkessel) bezüglich der Temperaturen besser anpaßbar. Mit der Senkung der Temperaturanforderungen sinkt auch der Exergiebedarf. Der Einsatz regenerativer Systeme erfordert eine gezielte Belüftung und unterstützt den Trend, daß Niedrigenergiehäuser zwar einen sehr geringen Wärmebedarf aber einen etwas erhöhten Elektroenergiebedarf haben. In größeren Gebäuden sind durch Leittechnik gestützte Systeme des Gebäudemanagements, die die Energiebereitstellung dem augenblicklichen Bedarf anpassen, sehr effektiv.

Die Prozeßwärmeversorgung erfordert gewöhnlich höhere Temperaturen, wobei der Hauptbedarf oberhalb 100°C liegt und bis in den Hochtemperaturbereich der Metallurgie reicht. Bei mittleren Temperaturen ist die Festlegung der Arbeitstemperaturen eine Optimierungsaufgabe, geringere Temperaturen führen zu einer Minderung des Exergiebedarfes und einer Effektivitätserhöhung bei der Kraft-Wärme-Kopplung. Außerdem können niedrigere Temperaturen eine effektive Wärmeversorgung durch

¹¹⁸ Vgl. H. L. von Cube: Handbuch der Energiespartechiken, Bd. 2 und 3 (Spartechiken bei der Nutzung fossiler Energieträger, Gebäudetechnik, Wärmerückgewinnung, Wärmepumpen, Kraft-Wärme-Kopplung, Nutzung regenerativer Energien, passive Spartechnik, Solartechnik, Biogas, Windenergie, Energiespeicher, Wärmeschutz) und Bundesministerium für Wirtschaft: Energiesparen im Betrieb.

regenerative Abwärmenutzung¹¹⁹ oder Abwärmenutzung mittels Wärmetransformation¹²⁰ ermöglichen.

Der Wärmebedarf ist außerdem sehr stark durch die Struktur einer Technologie und die vorhandenen energetischen Verknüpfungen geprägt. So ergeben z.B. mehrstufige Verdampfer- oder Destillationsanlagen günstige Möglichkeiten regenerativer Verknüpfungen, sowohl durch Wärmeübertragung als auch durch Wärmetransformation. Die Kombination von Anlagen und Einspeisung in nachfolgende Produktionsstufen ohne Zwischenkühlung kann den Wärmebedarf ebenfalls beträchtlich verringern.

Abproduktnutzung und Stoffrecycling bewirken ebenfalls eine Senkung des Prozeßwärmebedarfs, weil die Leistungsanforderungen an die Technologie gesenkt werden. Sie erfordern allerdings eine qualitätsgerechte Rückführung, weil sonst der zusätzliche Trenaufwand oder Mischungsverluste die positiven Effekte wieder aufheben können.¹²¹ In solchen Fällen kann eine energetische Nutzung durch Verbrennung und eine damit verbundene Senkung des äußeren Wärmebedarfes sinnvoll sein.

Die Abwärmenutzung ist die wohl bekannteste Maßnahme zur Energiebedarfssenkung. Im Falle einer primären Nutzung wirkt die Senkung beim Verursachungsprozeß selbst, im Falle einer sekundären Nutzung wird der Einsatz eines anderen Energieträgers bei einem anderen Verbraucher substituiert.¹²² Technische Maßnahmen sind z.B. Regeneration, Einsatz regenerativer Wärmenetze, Einsatz der Wärmetransformation zur Erreichung von Nutznieaus und Einsatz von Industrieabwärme zur regionalen Wärmeversorgung.

Bei den Antrieben und der Förderung liegen die technischen Schwerpunkte bei der Verdichteroptimierung in Verbindung mit einer möglichen Abwärmenutzung, bei der Optimierung von Verbrennungsmotoren bzw. der mit ihnen verbundenen Antriebe und bei der Regelung elektrischer Motore durch Leistungselektronik.

Das technische Einsparpotential bei der Beleuchtung ist durch Einsatz moderner Lampen, Leuchten und nutzungsgerechte Ausleuchtung gekennzeichnet. In einzelnen Fällen können diese Maßnahmen zu einer gravierenden Änderung des Energiebedarfs und der Kosten führen, in anderen Fällen können sie vernachlässigbar sein. Die möglichen Auswirkungen auf den Primärenergiebedarf der BRD liegen im Bereich von einem halben Prozent.

Der Energiebedarf von Transport und Verkehr läßt sich nicht nur über den Verbrauch durch Fahrzeuge und Fördereinrichtungen sondern auch über die Gestaltung

¹¹⁹ Vgl. K. Michalek: Wärmenetze.

¹²⁰ Vgl. D. Hebecker: Wärmetransformation.

¹²¹ Vgl. W. Fratzscher et. al.: Energiewirtschaft für Verfahrenstechniker.

¹²² Vgl. H. Schaefer: Energiewirtschaftliche Bedeutung der Nutzung von Abfallenergie.

der Logistik beeinflussen. Der spezifische Transportenergieaufwand nimmt in der Konkurrenz der Transporttechnologien in folgender Richtung tendenziell ab: Flugzeug, Kraftfahrzeug, schienengebundener Verkehr, Schiffsverkehr, Pipeline. Abgesehen davon, daß die betriebswirtschaftlichen Kosten die energetische Situation nicht widerspiegeln, was u. a. auf die Nichtberücksichtigung externer Kosten zurückzuführen ist, wird die Einstellung eines energie- und umweltoptimalen Verkehrsträgermixes durch die technischen Eigenschaften der Transporttechnologien behindert. Die Transporttechnologien unterscheiden sich z. B. in Reichweite, Kapazität, Geschwindigkeit, Flexibilität, Sicherheit, Zuverlässigkeit und Pünktlichkeit. Ihre Optimierung erfordert eine besondere Logistik. Lösungen wie die „rollende Landstraße“, Umlade- oder Verteilerzentren sind bisher regional, auf einzelne Verkehrsträger, Branchen oder Unternehmen beschränkt.

2.3.6.5 Technische Optionen einer nachhaltigen Energiewirtschaft

Aufgrund der Bestrebungen, ein nachhaltiges auf die Zukunft orientiertes Wirtschaften zu erreichen, existieren eine Reihe von Untersuchungen, die sowohl spezielle technologische Komponenten als auch wirtschaftliche Randbedingungen und ethische und politische Bewertungen enthalten.¹²³ Abgesehen davon, daß sie belegen, daß eine nachhaltige Energiewirtschaft machbar und die Änderung bestimmter wirtschaftlicher und politischer Randbedingungen wünschenswert erscheint, können sie die technischen und wirtschaftlichen Entwicklungen nicht voraussehen. Aus diesem Grund hat eine aus der Thermodynamik abgeleitete Strategie, wie der sinnvolle Umgang mit Ordnungsstrukturen in der Natur zu bewerkstelligen und ihre Ausnutzung in technischen Prozessen durch Energie- und Stoffwandlungskaskaden zur Gewährleistung der Ordnungsstrukturen der menschlichen Industriegesellschaft zu organisieren ist, eine besondere Bedeutung. In Schlagworten formuliert bedeutet das den Übergang von der Energiewirtschaft zur Entropiewirtschaft.¹²⁴

¹²³ Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ des Deutschen Bundestages: Schutz der Erde - Eine Bestandsaufnahme mit Vorschlägen zu einer neuen Energiepolitik, Die Grünen im Bundestag: Das Grüne Energiewendeszenario 2010 - Sonne, Wind und Wasser, U. Fritsche et al.: Das Grüne Energiewendeszenario 2010, D. Seifried: Greenpeace Studie: Least-Cost Planning - Der Weg zum Umbau unseres Energieversorgungssystems und U. Steger, A. Hüttl: Strom oder Askese? - Auf dem Wege zu einer nachhaltigen Strom- und Energieversorgung.

¹²⁴ Für die Gestaltung technischer Systeme ist diese Forderung im Prinzip schon in den 30er Jahren in dem Buch von Bosnjaković „Kampf den Nichtumkehrbarkeiten“ erhoben worden.

In der Energietechnik steht eine Vielzahl von Umwandlungstechniken von der Primär- zur Gebrauchsenegie und Anwendungstechniken von der Gebrauchs- zur Nutzenergie zur Verfügung. Zur Zeit dominieren noch Techniken auf der Basis der Verbrennung und Wärmeübertragung. Durch die zunehmende Einbeziehung anderer Wandlungstechniken ergibt sich eine weitergehende Diversifizierung und Kombination unterschiedlicher Techniken mit für sie typischen bevorzugten und weniger sinnvollen Anwendungsbereichen. Diese, besonders in der Industrie vorhandene, technologische Vielfalt erfordert strategisch wirkende Randbedingungen zur Entwicklung nachhaltiger Technologien.

Keine der hier angeführten Techniken scheint in absehbarer Zeit unter den gegebenen Randbedingungen in der Lage, die Energie- und Umweltprobleme der Menschheit allein und auf Dauer zu lösen. Das Einsparpotential dieser Techniken erscheint aber nach ersten Abschätzungen so groß, daß die CO₂-Minderungsziele der Bundesregierung in erster Linie als Problem wirtschaftlicher, rechtlicher und politischer Randbedingungen erscheinen. Im Ergebnis der technologischen Vielfalt führt eine Reihe denkbarer Szenarien zum gleichen Minderungsergebnis.

Durch die Diversifizierung ergeben sich auch Folgerungen für den Maschinen- und Anlagenbau und die internationale Arbeitsteilung. Die Entwicklungen zur Nutzung regenerativer Energien, zur dezentralen Energieversorgung, zur rationellen Energieverwendung und zum Umweltschutz erfordern in vielen Fällen die qualifizierte und arbeitsintensive Lösung von Anpassungsproblemen. Das erscheint als günstiges Tätigkeitsfeld mittelständischer EG-weit wirkender Unternehmen. Die neueren Entwicklungen im Energie- und Kraftwerksanlagenbau scheinen die Spezialisierung und internationale Arbeitsteilung innerhalb und zwischen Großunternehmen zu fördern. Das hängt auch damit zusammen, daß sich ein großer Teil der Wachstumsmärkte in den Entwicklungsländern befindet, die einen Service von der Finanzierung über den Betrieb bis zur Stilllegung von einem Partner erwarten.

Eine Reihe von modernen Techniken (z. B. Photovoltaik) sind international vor wachsender Bedeutung und auch für den deutschen Anlagen- und Maschinenbau interessant, haben aber wahrscheinlich mittelfristig für den deutschen Markt keine Bedeutung.

Der Zeitpunkt des Eintritts der Kernenergie in den Markt und ihre nachfolgender Krise (in Verbindung mit den aufgetretenen Störfällen) sind durch wirtschaftliche und soziale Entwicklungen und politisch verursacht. Aus technologischer Sicht besteht für die Kernenergie bezüglich der gesamten Energiekette vom Erz bis zur Endlagerung Entwicklungsbedarf. Dieser Bedarf reicht von der Grundlagen- bis zur Anwendungsforschung. Es erscheint deshalb sinnvoll, die Option Kernenergie offen zu halten, weil der wachsende Energiebedarf der Entwicklungsländer in Verbindung

mit dem Treibhausproblem, die Kernenergie als Alternative zur Kohlenutzung favorisieren könnte.

Bei der Energieerzeugung scheinen durch Entwicklungen in der Grundlagenforschung und der Fertigungstechnik technologische Sprünge durchaus möglich zu sein. Bei der rationellen Energieverwendung liegt dahingegen der Schwerpunkt bei einer innovativen Anwendung und Kombination an und für sich bekannter Techniken.

Während die energietechnische Entwicklung für standardisierte oder Massenbedarfsgüter (z. B. Wärmeerzeuger, Gebäude, Fahrzeuge) durch Randbedingungen wie Umweltauflagen, Subventionen oder Steuern mehr oder weniger sinnvoll gesteuert werden kann, ist das für den Bereich der Energieanwendung in der industriellen Produktion nahezu auszuschließen. Dieses technologisch komplexe Potential ist wahrscheinlich am besten durch Einstellung investitionsfreundlicher marktwirtschaftlicher Bedingungen, bei höherer Wichtung von Umwelt und Energie im Vergleich zum Kapital, zu erschließen.

2.3.7 *Schlußfolgerungen*

Gegenstand der Energietechnik

Die Energietechnik umfaßt die Bereiche Energieerzeugung, -verteilung und -anwendung. Bewertungen erfordern eine ganzheitliche Betrachtung der Wandlungskette. Die Realisierung optimaler Verfahren und Anlagen ist eng mit der Leistungsfähigkeit des Apparate- und Anlagenbaus verbunden.

Eine Bewertung der komplexen Prozesse und Zusammenhänge erfordert sowohl auf der thermodynamischen als auch auf der wirtschaftlichen Ebene eine einheitliche Betrachtung von Energie- und Stoffwandlung. Für diese Aufgabenstellung scheint die Exergie besonders geeignet. Bewertungen, die auf reinen Energiebilanzen beruhen, können insbesondere beim Auftreten von Wärmen in den Bilanzen zu falschen Schlußfolgerungen führen.

Energie und Gesellschaft

Das Verhältnis zwischen Energietechnik und Gesellschaft ist mehrdimensional und umfaßt historische, betriebswirtschaftliche, volkswirtschaftliche, politische, ethische und juristische Komponenten. Es erfordert im konkreten Entscheidungsfall eine Kompromißfindung.

Die besonders hohen Substitutionsmöglichkeiten der Ware Energie verbieten eine einseitige Behandlung. Die Substitutionsmöglichkeiten betreffen aus technischer Sicht die zwischen Energieträgern, Stoffen, Apparaten und Maschinen und aus volkswirtschaftlicher Sicht die zwischen Energie, Kapital und Arbeit. Der strategische Entscheidungsprozeß betrifft nicht nur einzelne Optionen sondern ein ganzes Netzwerk.

Aus historischer Sicht sind Probleme in Verbindung mit Primärenergie- und Rohstoffsubstitution nicht neu. Bereits in der vorindustriellen Vergangenheit haben Produktionssysteme, insbesondere bei einseitigen Entwicklungen, zu Ressourcenmangel bzw. Umweltschäden und den entsprechenden Korrekturmaßnahmen geführt. Die neue Qualität der Probleme besteht in ihrer Quantität und Globalisierung. Sie macht eine internationale Kooperation bei der Problemlösung notwendig. Die Bedeutung der Energiewirtschaft als Basis der industriellen Gesellschaft rechtfertigt eine eigenständige Energiepolitik. Diese ist auch durch den quantitativen Anteil der Energieträger an der gesamten Rohstoffnutzung und den Anteil an der Umweltbelastung gerechtfertigt.

Die Energiekette von der Roh- zur Nutzenergie

Die thermodynamische Analyse der Energiekette zeigt, daß der dominierende Aspekt nicht in den Energiebilanzen, sondern in der Veränderung von Ordnungszuständen sichtbar wird. Das Ziel einer nachhaltigen Entwicklung aus der Sicht der Energietechnik bedeutet deshalb Minimierung der Entropieproduktion und Übergang von der Energie- zur Entropiewirtschaft.

Die Entropiewirtschaft ist darauf gerichtet, den Primärenergie- und Rohstoffeinsatz für den Verwendungszweck zu optimieren und Abfallenergieverluste zu vermeiden. Die Verluste durch Entropieproduktion (Exergieverluste durch Triebkraftabbau) können bei Beibehaltung des Wirkprinzips oft nur durch systemtechnische Maßnahmen zur optimalen Prozeßkopplung verringert werden (Energiewandlungs- und Stoffwandlungskaskaden verbunden mit Transformationsprozessen und Koppelproduktion).

Wesentliche Bausteine zur Realisierung dieser Kaskaden sind Wärmenetze und Wärmetransformationsprozesse. Während Wärmenetze in verschiedenen Bereichen der stoffwandelnden Industrie wie der Erdölverarbeitung mit betriebswirtschaftlichem Erfolg betrieben werden, existieren für Wärmetransformationsprozesse zur Abwärmenutzung im wesentlichen nur Pioniersysteme. Es besteht noch beträchtlicher Forschungsbedarf in der Grundlagen- und Anwendungsforschung. Die z. Z. verbreitetste und wirtschaftlich zur Bereitstellung von Niedertemperaturwärme

effektivste Methode ist die Kraft-Wärme-Kopplung, wenn ein entsprechender regional konzentrierter Verbrauch vorliegt.

Primärenergien

Bei Beibehaltung des gegenwärtigen Primärenergiemixes ist mittelfristig kein Ressourcen-, wohl aber ein Umweltproblem zu erwarten.

Die ungleichmäßige Ressourcenverteilung der Welt kann aber durch politische Instabilitäten zu Versorgungsengpässen auf einem globalisierten Primärenergieträgermarkt führen.

Die bekannten Erdölressourcen sind im wesentlichen auf den arabischen Raum mit seinen politischen Instabilitäten konzentriert. Länder mit großen Kohlevorkommen wie China könnten geneigt sein, ihren Wachstumsbedarf mit Kohle zu decken und damit das Treibhausproblem noch zu verschärfen.

Unter den Einkommensenergien weisen nur Wasserkraft und in bestimmten Gebieten Windenergie beachtliche wirtschaftliche Potentiale aus. Da das wirtschaftliche Wasserkraftpotential schon zu etwa zwei Dritteln als genutzt gilt, erwarten die meisten Prognosen keine wesentliche Verschiebung des Primärenergiemixes.

Ein verstärkter Erdgaseinsatz ist zur Senkung der CO₂-Emissionen durchaus möglich. Da Erdgas i. a. aber ein Koppelprodukt zu Erdöl ist und der wesentliche Effekt aus der Substitution der Kohle stammt, beträgt die maximale, wirtschaftlich nicht realisierbare CO₂-Senkung etwa 30%. Diese wäre bei dem zu erwartenden, wachsenden Primärenergieverbrauch bald wieder aufgebraucht.

Die Kernenergienutzung ist derzeit die einzige global zur Verfügung stehende Energiewandlungstechnologie, die eine CO₂-freie, wirtschaftliche Energiebereitstellung in großem Ausmaße erlaubt. Sie ist allerdings mit den Problemen des Brennstoffkreislaufes und der Sicherheit vor allem hinsichtlich älterer Kernkraftwerke behaftet. Aus technischer Sicht erscheint das Sicherheitsproblem lösbar und eher ein Problem sozialer Wertungen zu sein. Die Probleme des Brennstoffkreislaufes und der Entsorgung radioaktiver Abfälle erfordern allerdings auch in Hinblick auf die bestehenden Kernkraftwerke noch Forschungs- und Entwicklungsarbeit. Die Betrachtung der Ressourcen an Kernenergie zeigt außerdem, daß bei Nutzung dieser Option die Entwicklung von Brutreaktoren folgerichtig und notwendig ist.

Zusammenfassend ist festzustellen: CO₂-freie Energieträger wie regenerative Energien treffen auf Energiedichte- und Kostenprobleme, die Kernenergie auf Akzeptanzprobleme und technologischen Entwicklungsbedarf. Verstärkter Erdgaseinsatz kann das Problem nur zeitweise mildern. Der Schwerpunkt zur Entla-

stung der Ressourcen- und Umweltbilanz muß deshalb in der rationellen Energieverwendung liegen.

End- und Nutzenergien

Die Sektoren Industrie, Verkehr und Haushalt spielen für die rationelle Energieverwendung etwa die gleiche Rolle. Durch technische Entwicklungen ist eine wachsende Bedeutung der Elektroenergie zu verzeichnen.

Eine Konzentration der Maßnahmen zur rationellen Energieverwendung auf Gebäudeheizung und Wärmeschutz erreicht etwa nur ein Drittel des Potentials. Diese Maßnahmen sind allerdings relativ leicht realisierbar. So sind insbesondere bei der Wohnraumheizung große Erfolge erzielt worden und noch zu erwarten, wenn man an die Realisierung des Niedrigenergiehauses denkt.

Der Bereich des Verkehrs und Transports ist funktional im Prinzip den anderen Sektoren zuzuordnen. Durch die wachsende Arbeitsteilung und die Globalisierung der Märkte wächst insbesondere der Güterstraßenverkehr in einem Maße, daß er die Spareffekte anderer Bereiche wieder zunichte machen könnte. Hier ist eine Beeinflussung des Verkehrsträgermixes, eine Verbesserung der Effektivität der Transportmittel und eine Verbesserung der Verkehrslogistik notwendig. Eine Vermeidung von volkswirtschaftlich schädlichen Transporten kann z. B. durch eine Internalisierung externer Kosten erreicht werden. Durch seine ausgeprägte Typisierung der Technologien ist der Verkehr prinzipiell Lenkungs- und Steuerungsalgorithmen zugänglich.

Das Sparpotential der Industrie ist durch die Möglichkeit der Prozeßkaskadisierung hoch. Es ist allerdings einer Typisierung nur für einzelne Prozesse zugänglich. Seine Erschließung ist eine selbständige technologische Aufgabe. Diese ist arbeitsintensiv und erfordert technologisches know-how, sollte also den Standortbedingungen Deutschlands gut entsprechen. Mängel in der Erschließung erfordern die Verbesserung wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Randbedingungen.

Techniken und Technologien zur Energiewandlung und -bereitstellung

Die effektive Energiespartechnik Kraft-Wärme-Kopplung ist durch die schlechte Speicherbarkeit und Transportfähigkeit von Wärme sehr eng an die Bedingungen eines lokalen Wärmemarktes und die Absatzmöglichkeiten des Koppelproduktes Elektroenergie gebunden.

Die Wärmepumpe bzw. -transformation, als weitere Möglichkeit Wärme relativ verlustfrei bereitzustellen, erfordert wegen der erhöhten Aufwendungen günstige Standortbedingungen.

Die konventionellen Kraftwerks- und Heizungstechniken sind durch Anlagenoptimierung, Kopplung von Gasturbinen- und Dampfkraftprozeß (GuD-Prozeß), Einbeziehung der Kohlevergasung und Brennwerttechnik soweit entwickelt, daß sie eine Emissionsminderungen in der Größenordnung der CO₂-Minderungsziele der Bundesregierung ermöglichen.

Zu den modernen Techniken mit beachtlichem Verbesserungspotential, aber schwer einzuschätzendem Markteintritt bzw. Marktdurchdringung, gehören die solarthermische Sonnenenergienutzung, die Photovoltaik, die Wasserstofftechnik und die Brennstoffzelle. Das z. Z. in der BRD zu beobachtende schnelle Wachstum der Windenergienutzung ist den besonderen Förderbedingungen zuzurechnen und kein Ausdruck des wirklichen Potentials. Die Kernfusion kann nach dem heutigen Entwicklungsstand noch für Jahrzehnte aus den Betrachtungen gelassen werden. Als Haupthindernis für die Nutzung von Sonnen- und Windenergie in autarken Systemen erweist sich eine bisher noch fehlende Lösung für das Speicher- und Transportproblem.

Aus heutiger Sicht wird man wahrscheinlich wenigstens für mehrere Jahrzehnte mit einem Primärenergieträger- als auch Energiewandlungsmix rechnen müssen. Dabei führen unterschiedliche Pfade zu einer nachhaltigen Energiewirtschaft.

Anforderungen an den Apparate- und Anlagenbau

Die Produktionssysteme der Energiebereitstellung, -verteilung und -anwendung werden in Zukunft vielfältiger und vielgestaltiger werden, da nur auf dieser Grundlage eine jeweils optimale Anpassung möglich erscheint und damit eine Minderung der Aufwendungen bzw. Verluste möglich wird.

Von der Betriebsführung her sind die Produktionssysteme durch eine hochentwickelte Prozeßleittechnik gekennzeichnet, so daß sie im größeren Rahmen nur wenig Betriebspersonal erfordern. Kleinere Anlagen werden sicher vollautomatisch betrieben.

Größere Anlagen werden im zunehmenden Maße durch die technologische Verbindung von Stoff- und Energiewandlung geprägt werden. Das erfordert entsprechende Auslegungsstrategien, deren Grundlagen in methodischer Hinsicht zur Verfügung stehen.

Andererseits wird die Zahl kleinerer Anlagen in starkem Maße zunehmen, um dezentral, den jeweiligen Bedingungen optimal angepaßt, energetische Bedürfnisse be

<p>Wirtschaftliche und rechtliche Randbedingungen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Relative Verteuerung von Energie gegenüber Kapital • Relative Verteuerung von Energie gegenüber menschlicher Arbeit • Relative Verteuerung von Kapital gegenüber menschlicher Arbeit • Regulierung und Entmonopolisierung der Energiemärkte • Regulierung der Energieanwendung
<p>Primärenergieeinsatz</p> <ul style="list-style-type: none"> • Standortrelevanter Ausbau der Nutzung regenerativer Energien • Lösung der Alllastenfrage der Kernenergetik • Vorbereitung eines Technologiewandels in der Kernenergetik • Konzentration bei konventionellen Brennstoffen auf die modernste Technik • Zunehmender Einsatz von Brennstoffzellen
<p>Endenergieverwendung (Energiemanagement)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Weltweiter Elektroenergieverbund (Global Link) • Ausbau von Nah- und Fernwärmesystemen • Anbieten von Energiedienstleistungen • Least-Cost Planning für die Erweiterung von Energiebereitstellungsanlagen • Energetisches Gebäudemanagement • Transportmittel-, Transport- und Verkehrsoptimierung • Energiemanagement in der Produktion
<p>Rationelle Energieverwendung (Energietechnologie)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Verbesserung der Isolierung • Bauphysikalische Gebäudeoptimierung • Abwärmevermeidung durch Prozeßkaskadisierung und Regeneration • Abwärmevermeidung durch Kombination von Produktionsprozessen • Verlustsenkung durch Integration von Energiewandlungsprozessen in Stoffwandlungsanlagen • Abwärmennutzung durch Wärmetransformation • Primärenergieeinsparung durch Rohstoff-, Material- oder Ausrüstungsrecycling • Primärenergieeinsparung durch energetische Nutzung von Abprodukten • Automatisierung und mikroprozessorgesteuerte optimale Fahrweise von Energiewandlern • Leistungselektronisch gesteuerte elektrische Antriebe • Beleuchtungsoptimierung und Einsatz von Energiesparlampen

Abbildung 2.3-15

Optionen, die einen Beitrag zur rationellen Energieverwendung bzw. Senkung von Emissionen leisten können

friedigen zu können. Auch ökologische Gesichtspunkte unterstützen eine solche Entwicklung.

Die Vielfalt der Anforderungen läßt sich auch dann erfüllen, wenn aus Fertigungs- und Kostengründen auf Module zurückgegriffen wird. Das Verwenden von Standardmodulen ist möglich, weil die Art der erforderlichen Grundprozesse bekannt ist, die Grundstrukturen vorliegen und Algorithmen zur Anpassung und Optimierung vorhanden bzw. entwickelbar sind.

Die Vielfalt wird noch größer, wenn nicht nur an den landeseigenen Bedarf sondern auch an einen möglichen Export gedacht wird. Aufgrund der natürlichen Gegebenheiten lassen sich die energetischen Bedürfnisse der einzelnen Länder in unterschiedlicher Weise optimal befriedigen. Früher unterschied man zwischen Ländern mit kalorischer und mit hydraulischer Energiebasis. Dieser Unterschied wird sicher weiter für die Einschätzung und Entwicklung der Energietechnik maßgebend sein, daneben können aber Windverhältnisse und Einstrahlungsbedingungen zukünftig Bedeutung erlangen. Für den Umgang mit der Kernenergieanwendung spielt die Sicherheitskultur der Länder eine entscheidende Rolle.

Durch die sich zunehmend global öffnenden Märkte kann der Energieanlagenbau einen entscheidenden Beitrag zur Lösung weltweiter Umweltprobleme leisten. Voraussetzung hierfür ist, daß von politischer Seite eine entsprechende positive Willenserklärung vorliegt und die Bereitschaft Entscheidungen in dieser Hinsicht, z. B. durch gesetzgeberische und steuerliche Maßnahmen zu fördern.

Optionen für eine nachhaltige Energiewirtschaft

In Abbildung 2.3-15 erfolgt eine kurze zusammenfassende Darstellung von Optionen, die eine Verbesserung der Energieverwendung und Senkung der energiebedingten Emissionen bewirken können.

Die Optionen sind im Zusammenhang mit den Ausführungen in den voranstehenden Kapiteln zu sehen. Insbesondere erfolgten Darlegungen zur mehrdimensionalen Bewertung und dem Wirken von Randbedingungen im Kapitel „Energie und Gesellschaft“, zur komplexen Bewertung der Energiekette im Kapitel „Die Energiekette von der Roh- zur Nutzenergie“, zum möglichen Primärenergiemix im Kapitel „Primärenergien“, zur möglichen Entwicklung und Beeinflußbarkeit des Energiebedarfes im Kapitel „End- und Nutzenergien“ und zu technischen Möglichkeiten für Effektivitätserhöhungen im Kapitel „Techniken und Technologien zur Energiewandlung und -bereitstellung“.

Da die Optionen Bestandteil eines Entscheidungsnetzwerkes sind, können sie nicht isoliert betrachtet werden. Bei isolierter oder unsachgemäßer Ausgestaltung können sie kontraproduktiv wirken. Ein Teil der Optionen wirkt nur im internationalen

Kontext in die gewünschten Richtung. Bei einem Teil der Optionen ist unter dem Gesichtspunkt der Ressourcenbeschränkung (wirtschaftliche, finanzielle) unter den gegenwärtigen Randbedingungen das Optimum bereits überschritten.

2.3.8 Literatur

- U. Bastiansen: Der Energieträger der Zukunft Wasserstoff statt Kernkraft, Kohle und Benzin. Eichborn Verlag, Frankfurt am Main 1987.
- I. Bousted, G. F. Hancock: Handbook of Industrial Energy Analysis. Ellis Harword, Chichester, 1979.
- Bundesminister für Wirtschaft: Abschätzung des Potentials erneuerbarer Energiequellen in der Bundesrepublik Deutschland - Kurzfassung, Studienreihe 44, Bonn 1995.
- Bundesministerium: Deutscher Delphi-Bericht zur Entwicklung von Wissenschaft und Technik. Bundesministerium für Forschung und Technologie, Bonn 1993.
- Bundesministerium: Energieeinsparung und erneuerbare Energien - Berichte aus den energiepolitischen Gesprächszirkeln beim Bundesministerium für Wirtschaft. Dokumentation Nr. 361. Bundesministerium für Wirtschaft, Referat Öffentlichkeitsarbeit, Bonn. 1994.
- Bundesministerium: Energiesparen im Betrieb. Bundesministerium für Wirtschaft, Referat Öffentlichkeitsarbeit, Bonn. 1994.
- Bundesregierung: Energie - Forschung und Technik. Nutzung der Solartechnik für die Niedertemperatur-Wärmeversorgung. Bericht der Bundesregierung über die Nutzung der Solartechnik für die Niedertemperatur-Wärmeversorgung in der Bundesrepublik Deutschland. Bonn 1984. Verlag TÜV Rheinland.
- Bundestag: Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ des Deutschen Bundestages: Schutz der Erde - Eine Bestandsaufnahme mit Vorschlägen zu einer neuen Energiepolitik. Teilband 1 und 2. Economica Verlag, Bonn 1991. Verlag C.F. Müller, Karlsruhe 1991.
- M. von Baratta (Hrsg.): Der Fischer Weltalmanach 1996. Fischer Taschenbuchverlag, Frankfurt am Main 1995.
- H. L. von Cube: Handbuch der Energiespartechneiken Bd. 1 bis 3. Kompendium für Lehre und Praxis. Bd. 1: Technische und wirtschaftliche Grundlagen. Bd. 2: Spartechniken bei der Nutzung fossiler Energieträger. Gebäudetechnik, Wärmerückgewinnung, Wärmepumpen, Kraft-Wärme-Kopplung. Bd. 3: Nutzung regenerativer Energien und passiver Spartechnik. Solartechnik, Biogas, Windenergie, Energiespeicher, Wärmeschutz. Verlag C. F. Müller, Karlsruhe 1983.
- G. Erdmann: Energieökonomik - Theorie und Anwendungen. vdf, Hochschulverl. an der ETH Zürich oder B. G. Teubner Stuttgart, 1995.
- Technologie der Photovoltaik - Eine EUROSOLAR-Studie im Auftrag der Kommission der Europäischen Union. Photovoltaik Technologie Report. Eurosolar, Plittersdorfer Str. 103, Bonn 1993.
- Fachinformationszentrum Karlsruhe (Hrsg.): Blockheizkraftwerke - Ein Informationspaket. Verlag TÜV Rheinland, Köln 1990.
- Fachinformationszentrum Karlsruhe (Hrsg.), Ges. für Wiss.-Techn. Information mbH: Kommunale Energieversorgung, Energiekonzepte, Nah- und Fernwärme, energetische Nutzung von Abfall - ein Informationspaket. Verlag TÜV Rheinland, Köln 1990.

- U. Fahl, M. Fischendick, M. Kaltschmitt, A. Voß: Möglichkeiten der CO₂-Emissionsminderung in der Elektroenergieerzeugung Baden-Württembergs. BWK 44 (1992) 7/8, 341 - 347.
- S. Feldhaus: Die Energieversorgung als ethischer Kristallisationspunkt des Konfliktes zwischen Ökonomie und Ökologie. VDI-Bericht 984, 323-339. VDI-Verlag, Düsseldorf 1992.
- S. Feldhaus: Energie-Ethik. Zur ethischen Bewertung einer verantwortbaren Energieversorgung und zum Problem ihrer gesellschaftlichen Akzeptanz. In W. Fratzscher, K. Stephan (Hrsg.): Abfallenergienutzung ... 1995, s.u.
- B. Fischer, L. Hahn, Ch. Küppers, M. Sailer: Der Atom Müll Report. „Entsorgung“, Wiederaufarbeitung, Lagerung: das offene Ende der Atomwirtschaft. Eine Publikation des Öko-Instituts. Rasch und Röhring Verlag, Hamburg 1989.
- W. Fratzscher, K. Michalek: Einige Überlegungen zur systematischen Gestaltung der rationellen Energieanwendung: Wiss. Berichte der Ingenieurhochschule Zittau 602 (1985).
- W. Fratzscher, K. Michalek: Die Definition dimensionsloser Gütekriterien für Energie-wandlung und Energieanwendung. Energieanwendung 34 (1985) H. 6, S. 206 - 209.
- W. Fratzscher, V. M. Brodjanskij, K. Michalek: Exergie - Theorie und Anwendung. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1986. Distributed by Springer-Verlag.
- W. Fratzscher, K. Michalek, K.-H. Domhardt: Erfassung des Sekundärenergieanfalles und seine Bewertung - Erfahrungen. Energieanwendung 37 (1988) H. 1, S. 10 - 14. (Hier wurde wegen eines anderen Begriffssystems Sekundär- gleich Abfallenergie gesetzt.)
- W. Fratzscher et al.: Energiewirtschaft für Verfahrenstechniker. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1989.
- W. Fratzscher, K. Michalek: Calculation of Cumulative Exergy Expense for Chemical Production. In „Second Law Analysis of Energy Systems - Towards the 21-st Century“. Proceedings of the Workshop in Rom. School of Engineering, University of Roma 1 „La Sapienza“, July 5-7, 1995.
- W. Fratzscher, K. Stephan (Hrsg.): Abfallenergienutzung - technische, wirtschaftliche und soziale Aspekte. Interdisziplinäre Arbeitsgruppen der BBAW, Forschungsberichte Bd.2. Akademie Verlag, Berlin 1995.
- W. Fratzscher: Zur thermodynamischen Bewertung alternativer Energieträger. Berichte der Fördergemeinschaft Ökologische Stoffverwertung e. V. Halle (Saale), 2/96, S. 3 - 24.
- W. Fratzscher, K. Michalek: Aussagekraft von Bilanzen der kumulierten Energie- und Exergieaufwendungen. Proceedings des XV. Kongreß der internationalen Konferenz für industrielle Energiewirtschaft, Leipzig, 23.-25. Sept. 1996, Beitrag B2-1, 16 Seiten.
- W. Fratzscher, K. Stephan, K. Michalek: Energietechnik. In Bericht der Arbeitsgruppe „Optionen zukünftiger industrieller Produktionssysteme“, Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Dez. 1996.
- R. Frischknecht, P. Hostetter, I. Knoepfel, R. Dones, E. Zollinger: Ökoinventare für Energiesysteme. Bundesamt für Energiewirtschaft der Schweiz. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 1995.
- U. Fritsche, S. Kohler, D. Viehhus: Das Grüne Energiewendeszenario 2010. Öko-Institut e.V., Bremen/Darmstadt/Freiburg 1988.
- B. Geiger: Heizsysteme im Quervergleich - Aspekte zum Energieaufwand bei der Raumkonditionierung von Wohngebäuden. In H. Schaefer: Energieversorgung ... 1991, s.u.
- B. Geiger, H. Heß: Energiewirtschaftliche Daten. In VDI-Jahrbuch Energietechnik 1996. VDI-Verlag, Düsseldorf 1996.

- Gesellschaft für Reaktorsicherheit: Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke - Phase B. Eine Untersuchung im Auftrag des Bundesministers für Forschung und Technologie. Verlag TÜV Rheinland, Köln 1990.
- W. D. Glatzel: Abwärme. In O. Kimminich, Lersner, Storm: Handwörterbuch des Umweltrechts. 2. Aufl. (1994), Bd. 1, Sp. 58 - 68.
- Global 2000 - Der Bericht an den Präsidenten. Das Volk der Vereinigten Staaten von Amerika. Zweitausendeins, Berlin, Wiesbaden, 1980.
- Die Grünen im Bundestag /AG Energie: Das Grüne Energiewendeszenario 2010 - Sonne, Wind und Wasser. Kölner Volksblatt Verlag, Köln 1991.
- G. Gruhn u.a. : Verfahrenstechnische Berechnungsmethoden, Teil 6 Verfahren und Anlagen. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1984. Distributed by Springer Verlag.
- G. C. Goy: Erneuerbare Energiequellen - Abschätzung des Potentials in der Bundesrepublik Deutschland bis zum Jahr 2000. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung Berlin, Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung Karlsruhe. R. Oldenburg Verlag, München 1987.
- G. Hagedorn, F. Ilmberger: Kumulierter Energieverbrauch und Erntefaktoren von Photovoltaik-Systemen. Energiewirtschaftliche Tagesfragen 39 (1989) H.11, S. 712 - 718.
- U. Hauptmanns, M. Hertrich, W. Werner: Technische Risiken - Ermittlung und Beurteilung. Im Auftrag des BM für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Springer-Verlag, Berlin 1987.
- D. Hebecker: Zur Klassifikation von Kreisprozessen der Energietransformation. Wiss. Zeitschrift TH Leuna-Merseburg 25 (1983) 4, S. 485-492.
- D. Hebecker: Wärmetransformation. In W. Fratzscher, K. Stephan (Hrsg.): Abfallenergienutzung ... 1995, s.o.
- S. Heier: Nutzung der Windenergie - Ein Informationspaket. Fachinformationszentrum Energie-Physik-Mathematik Karlsruhe. Verlag TÜV Rheinland, Köln 1989.
- K. Heinloth: Energie und Umwelt - Klimaverträgliche Nutzung von Energie. Teubner, Stuttgart, Verlag der Fachvereine, Zürich 1993.
- O. Hohmeyer: Soziale Kosten des Energieverbrauchs, Springer-Verlag, Berlin 1989.
- S. Karamanolis: Sonnenenergie - Ausweg aus dem Öko-Energie-Dilemma. Elektra-Verlags-GmbH, München 1991.
- C. Keller, H. Möllinger: Kernbrennstoffkreislauf. Bd. 1, Allgemeine Aspekte, Versorgung von Kernkraftwerken. Dr. Alfred Hüthig Verlag, Heidelberg 1978.
- H. Klaiß, F. Staiß: Solarthermische Kraftwerke für den Mittelmeerraum. Deutsche Forschungsgesellschaft für Luft- und Raumfahrt (DLR). Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 1992.
- T. Klante: KoBra-Kombikraftwerk für Braunkohle. Energieanwendung und Energietechnik 42 (1993) 8, 424 -426.
- M. Kleemann, M. Meliß: Regenerative Energiequellen. Springer Verlag, Berlin 1988.
- H. Knappstein: Blockheizkraftwerk mit Brennstoffzellen. Gas Wärme International 43 (1994) 4, 139 - 145.
- P. Knauer: Anmerkungen zum Konzept der nachhaltigen Entwicklung: Berichte der Fördergemeinschaft Ökologische Stoffverwertung e. V. Halle (Saale), 2/96, S. 90 - 107.
- Kohlekraftwerke der Zukunft, Stand der Entwicklung, Erprobung und Planung neuer Kraftwerkstechnologien. Minister für Wirtschaft, Mittelstand und Technologie des Landes Nordrhein-Westfalen, 1990.
- K. Köthe: Stromversorgung mit Solarzellen - Methoden und Anlagen für die Energieaufbereitung. Franzisverlag, München 1991.

- W. Korff: Kernenergie und Moraltheologie. Der Beitrag der theologischen Ethik zur Frage allgemeiner Kriterien ethischer Entscheidungsprozesse. Frankfurt/M. 1979, 90.
- P. Krämer: Entwicklung der Energietechnik und deren Wechselwirkungen mit der Umwelt. Diss. TU Clausthal. CUTEC-Schriftenreihe Nr. 13, Clausthaler Umwelttechnik Institut, Clausthal-Zellerfeld 1995.
- K. Kugeler, R. Schulten: Hochtemperaturreaktortechnik. Springer Verlag, Berlin 1989.
- K. Kugeler, P.-W. Philippen: Energietechnik - technisch, ökonomische und ökologische Grundlagen. Springer-Verlag, Berlin 1993.
- K. Ledjeff: Neue Wasserstofftechnologien - Konkrete Nutzung unter Wasser, auf der Erde, im Weltall. Verlag C. F. Müller, Karlsruhe 1989.
- B. Linnhoff: Pinch analysis - a state-of -the art overview. Trans IChemE, Vol. 71, part A, sept. 1993, 503 - 522.
- B. Linnhoff et al.: User guide on process integration for the efficient use of energy. IChemE, 1982, Rugby.
- H. Lippold, A. Trogisch, H. Friedrich: Solartechnik - Thermische und fotoelektrische Nutzung der Solarenergie. Fachbuchverlag, Leipzig 1984; Lizenzausgabe für den Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin.
- C. Marchetti: Primary Energy Substitution Model: On the Interaction between Energy and Society. In W .D. Nordhaus (Hrsg.): Proceedings of the Workshop on Energy Demand, Report CP761, 803-844. IIASA, Laxenburg 1976.
- C. Marchetti, N. Nakicenovic: The Dynamics of Energy Systems an the Logistic Substitution Model. RR-79-13. IIASA, Laxenburg 1979.
- H. F. Mataré, P. Faber: Erneuerbare Energien - Erzeugung, Speicherung, Einsatzmöglichkeiten. VDI-Verlag, Düsseldorf 1993.
- W. Mauch: Methodik zur ganzheitlichen energetischen Bewertung. In VDI-Berichte 1190: Energiebewusstes Handeln und nutzgerechte Technik. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1995.
- D. L. und D. Meadows, E. Zahn, P. Milling: Die Grenzen des Wachstums. Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit, Hamburg 1973.
- D. Meissner: Solarzellen - Physikalische Grundlagen und Anwendung in der Photovoltaik. Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig/Wiesbaden 1993.
- W. Meng: Rechtliche Regeln über Abwärme in Deutschland. In W. Fratzscher, K. Stephan (Hrsg.): Abfallenergienutzung ... 1995, s.o.
- K. Michalek, K. Stritzel, K.-H. Domhardt: Berechnung des kumulierten Energieaufwandes für Produkte der stoffwandelnden Industrie. Chemische Technik 42 (1990) H. 12, S. 501 - 506.
- K. Michalek: Berechnung des kumulierten Energieaufwandes. Energieanwendung 40 (1991) H. 6, S. 186 - 188.
- K. Michalek: Wärmenetze. In W. Fratzscher, K. Stephan (Hrsg.): Abfallenergienutzung ... 1995, s.o.
- K. Michalek: Optionen für alternative Energieträger. Berichte der Fördergemeinschaft Ökologische Stoffverwertung e. V. Halle (Saale), 2/96, S. 26 - 54.
- S. Münzberg: Kumulierter Exergieaufwand für moderne Energiewandlungstechnologien. Diplomarbeit 1995. Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, FB Verfahrenstechnik.
- J.-P. Molly: Windenergie - Theorie, Anwendung, Messung. Verlag C. F. Müller, Karlsruhe 1990.
- Öko-Institut Freiburg: Die Risiken der Atomkraftwerke - der Anti-Rasmussen-Report der Union of Concerned Scientists. Verlag Adolf Bonz, Fellach, 1980.

- J. O'M Bockris, E. W. Justi: Wasserstoff - Energie für alle Zukunft - Konzept einer Sonnen-Wasserstoff-Wirtschaft. Udo Pfriemer Buchverlag im Bauverlag, Wiesbaden u. Berlin 1988.
- A. Prassek, J. Angloher: Energetischer Vergleich elektrochemischer Energiespeicher. In VDI-Berichte 1168: Energiespeicher für Strom, Wärme und Kälte, VDI-Verlag Düsseldorf, 1994.
- prognos: Identifizierung und Internalisierung der externen Kosten der Energieversorgung, Schäffer-Poeschel-Verlag, 1993.
- W. Rasch, F. Sanches, C.-J. Winter: Sonnenenergienutzung - Daten und Fakten auf der Schwelle zum Markt: BWK 44 (1992) 9, 399 - 404.
- F. Raudszus, R. Schmitz, L. Rupp: Das Solarenergie Buch. SYBEX-Verlag, Düsseldorf 1992.
- O. Renn: Technikfolgenabschätzung von Energiesystemen. In W. Fratzscher, K. Stephan (Hrsg.): Abfallenergienutzung ... 1995, s.o.
- G. Rössle: Das MAREN-Modell, Perspektiven einer Energiezukunft. Ansporn-Verlag, Hof / Saale 1989.
- E. Roth: Energetischer Vergleich von Kraftwerken BWK 46 (1994) 1/2, 28 - 32.
- F. Rummel, O. Kappelmeyer: Erdwärme - Energieträger der Zukunft? Fakten - Forschung - Zukunft. Verlag C. F. Müller, Karlsruhe 1993.
- RWE AG: Chancen und Risiken der künftigen Weltenergieversorgung. Steuern und Abgaben auf Energie - hohe Belastungen in Förder- und Verbraucherländern. Herbst '96.
- RWE Energie, Anwendungstechnik: Energieflußbild der BRD 1992. In VDI-Jahrbuch Energietechnik 1995. VDI-Verlag Düsseldorf.
- H. Schaefer (Red.): Struktur und Tendenzen in der Industriellen Energiebedarfsdeckung. FfE-Schriftenreihe Bd. 17. Springer-Verlag, Berlin 1985.
- H. Schaefer: Nutzung regenerativer Energiequellen - Zusammenstellung von Daten und Fakten für die Bundesrepublik Deutschland. VDI-Verlag, Düsseldorf 1987.
- H. Schaefer: Energieversorgung - Dienstleistung für rationelle Energienutzung. FfE-Schriftenreihe Bd. 20. Springer-Verlag, Berlin, 1991.
- H. Schaefer: Energiewirtschaftliche Bedeutung der Nutzung von Abfallenergie. In W. Fratzscher, K. Stephan (Hrsg.): Abfallenergienutzung ... 1995, s.o.
- Th. Schedl: kumulierter Energieaufwand zur Herstellung von Energiespeichern. In VDI-Berichte 1168: Energiespeicher für Strom, Wärme und Kälte, VDI-Verlag Düsseldorf, 1994.
- J. Schmid: Photovoltaik - Strom aus der Sonne - Technologie, Wirtschaftlichkeit und Marktentwicklung. C. F. Müller Verlag, Heidelberg 1994.
- E. F. Schmidt: Unkonventionelle Energiewandler. Elitera Verlag, Berlin 1975.
- Second Law Analysis of Energy Systems - Towards the 21-st Century. Proceedings of the Workshop in Rom. School of Engineering, University of Roma 1 „La Sapienza“, July 5-7, 1995.
- M. Seidel: Motorisch betriebene Blockheizkraftwerke (BHKW). BWK 46 (1994) 4, 166 - 169.
- D. Seifried: Greenpeace Studie: Least-Cost Planning - Der Weg zum Umbau unseres Energieversorgungssystems. Greenpeace e.V., Hamburg/Berlin 1992.
- U. Steger, A. Hüttl: Strom oder Askese? - Auf dem Wege zu einer nachhaltigen Strom- und Energieversorgung. Campus Verlag, Frankfurt/Main, New York. 1994.
- J. Szargut, D. R. Morris, F. R. Steward: Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metallurgical Processes. Hemisphere Publishing Corp., New York 1988. Distributed by Springer-Verlag.

- E. Thöne, U. Fahl: Energiewirtschaftliche Gesamtsituation. BWK 1994, H. 4, S. 113-118.
- J. Unger: Alternative Energietechnik. B. G. Teubner Stuttgart bzw. vdf Zürich, 1993.
- VDI-Fachauschuß Sonnenenergie im Auftrag des BMFT: Statusbericht Windenergie. VDI-Verlag, Düsseldorf 1980.
- VDI: Praxis solar- und windelektrischer Energieversorgung. VDI-Verlag, Düsseldorf 1982.
- VDI-Richtlinie 3780: Technikbewertung. Begriffe und Grundlagen. Verein Deutscher Ingenieure, Ausschuß Grundlagen der Technikbewertung (Beuth: Berlin, 1991)
- VDI: Soziale Kosten der Energienutzung: Externe Kosten heute - Betriebskosten morgen. VDI-Bericht 923. VDI-Verlag, Düsseldorf 1991.
- VDI: Wasserstoff als Energieträger - Arbeits- und Ergebnisbericht. Kolloquium 1994 des Sonderforschungsbereichs 270 der Universität Stuttgart. VDI-Verlag, Düsseldorf 1994.
- VDI: Global Link - Interkontinentaler Energieverbund. VDI-Bericht 1129. VDI-Verlag, Düsseldorf 1994.
- VDI: Entwurf der VDI-Richtlinie „Kumulierter Energieaufwand - Begriffe, Definitionen, Berechnungsmethoden“, VDI 4600, Mai 1995.
- VDI: Energiespeicher für Strom, Wärme und Kälte. VDI-Berichte 1168. VDI-Verlag, Düsseldorf. 1994.
- VDI: Solarthermische Kraftwerke II. VDI-Berichte 1200. VDI-Verlag Düsseldorf 1995.
- VDI: Lebensstandard, Lebensstil und Energieverbrauch. VDI-Berichte 1204. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1995
- A. Voß et al.: Externe Kosten der Stromerzeugung, VWEV-Verlag 1990.
- H.-G. Wagemann, H. Eschrich: Grundlagen der photovoltaischen Energiewandlung. B. G. Teubner, Stuttgart 1994.
- A. Wagner: Technisch-wirtschaftliche Bewertung photovoltaischer Stromversorgungssysteme. Dissertation Okt. 1994, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg.
- H.-J. Wagner, Th. Brandt: Ermittlung des Primärenergieaufwandes zur Herstellung ausgewählter Werkstoffe. Arbeitsbericht, Univers.-GH Essen, Mai 1995.
- H.-J. Wagner: Energieketten von A - Z - Erntefaktor und energetische Amortisationszeit. Elektrizitätswirtschaft 95 (1996) H. 8, S. 448 - 456.
- M. Weisheimer: Zur Bewertung energetischer Systeme unter Einschluß externer Kosten. In W. Fratzscher, K. Stephan (Hrsg.): Abfallenergienutzung ... 1995, s.o.
- H. Wendt, V. Plzak (Hrsg.): Brennstoffzellen, Stand der Technik, Entwicklungslinien, Marktchancen. VDI-Verlag, Düsseldorf 1990.
- A. Wiese: Ganzheitliche Bilanzen von Energiewandlungsketten und Energiesystemen. In W. Fratzscher, K. Stephan (Hrsg.): Abfallenergienutzung ... 1995, s.o.
- D. Winje, D. Witt: Energiewirtschaft. Bd. 2 der Handbuchreihe Energieberatung / Energiemanagement. Springer-Verlag, Berlin 1991.
- C.-J. Winter, J. Nitsch: Wasserstoff als Energieträger - Technik, Systeme, Wirtschaft. Springer Verlag, Berlin 1986.
- Worldwatch Institute Report: Zur Lage der Welt - Daten für das Überleben unseres Planeten. S. Fischer Taschenbuchverlag, Frankfurt am Main, jährlich bzw. zweijährlich.
- Zentralverband Elektrotechnik- und Elektroindustrie e. V.: Energie auf einen Blick 1992. Energie Verlag GmbH, Heidelberg, 1992.