

Rohstoff-Polymer-Verbund – heute und morgen^[**]

Von Klaus Weissermel^[*]

Professor Rolf Sammet zum 60. Geburtstag gewidmet

Vor dem Hintergrund vermehrter Nachfrage nach und begrenzter Verfügbarkeit von fossilen, nicht regenerativen Reserven und Ressourcen werden Wege zur künftigen Deckung des Rohstoff- und Energiebedarfs aufgezeigt. Die Ambivalenz von Erdöl, Erdgas und Kohle für den Energie- und Chemiesektor sowie Möglichkeiten zu deren schrittweiser Entkoppelung werden diskutiert. Unter Berücksichtigung des Faktors „Zeit“ werden die notwendigen Umstrukturierungsprozesse in ihren Auswirkungen auf den Rohstoff-Polymer-Verbund kritisch untersucht.

1. Fossile organische Rohstoffe: Verheizen oder Veredeln?

In keinem Industriezweig ist die Verflechtung von fossilen Energieträgern und organischen Rohstoffen so groß wie in der chemischen Industrie, denn Energieerzeugung und Chemieproduktion basieren heute weltweit zu über 90% auf den gleichen Naturprodukten: Erdöl, Erdgas und Kohle.

Es zeichnet sich ab, daß die beiden wichtigsten Chemie-rohstoffe – das Erdöl und das Erdgas – bereits mittelfristig und auch die Kohle langfristig zu erschöpfen drohen, falls es nicht gelingt, ihre Doppelfunktion als Energieträger und Rohstoff rechtzeitig schrittweise zu entkoppeln und schließlich aufzuheben.

Die Abwendung von der Kohle, dem am weitesten verbreiteten fossilen „Brennstoff“, und die Hinwendung zu Erdöl und Erdgas waren nur möglich, weil letztgenannte auf

dem Weltmarkt bis in die Gegenwart weit unter ihrem Energie- und Veredlungswert angeboten wurden und zusätzlich günstiger transportiert sowie verarbeitet werden konnten. In diesem ökonomischen Sog vollzog sich global während drei Jahrzehnten ein tiefgreifender Umstrukturierungsprozeß, wie Abbildung 1 verdeutlicht.

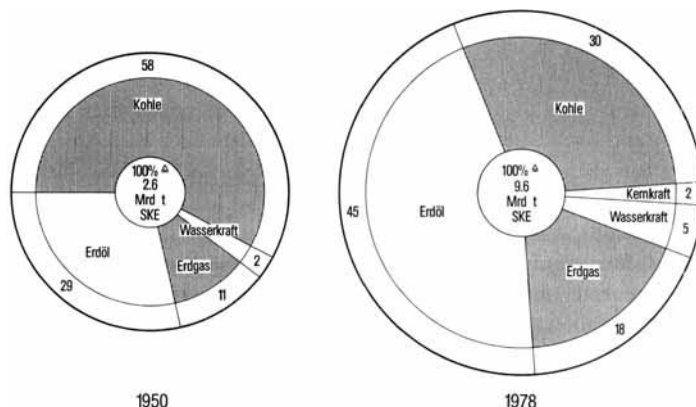


Abb. 1. Welt-Primärenergie-Verbrauch in den Jahren 1950 und 1978 (SKE = Steinkohleeinheit).

[*] Prof. Dr. K. Weissermel
Hoechst Aktiengesellschaft
Postfach 800320, D-6230 Frankfurt am Main 80

[**] Erweiterte Fassung eines Plenarvortrags beim 26th International Symposium on Macromolecules in Mainz am 20. September 1979.

Der Primärenergieverbrauch hat sich als Folge eines steilen Wirtschaftswachstums, vor allem in den hochentwickelten Industrieländern, nicht nur bezüglich der Menge, sondern auch bezüglich des Anteils der einzelnen fossilen Energieträger drastisch geändert. Besonders betroffen davon ist das Erdöl, das jetzt bei weitem die Hauptlast der Energieversorgung zu tragen hat. Angesichts seines geologischen Alters von ca. 500 Millionen Jahren sind wir dabei, diesen wertvollen, nicht regenerativen Rohstoff „in Sekundenschnelle“ zu verbrauchen.

Zur Zeit steigt der Ölkonsum trotz begrenzter geologischer, eingeschränkter politischer und veränderter ökonomischer Verfügbarkeit weiter und hat zwangsläufig das Versorgungsrisiko und die Importabhängigkeit vieler Länder außerordentlich verschärft. National und regional sind jedoch große Unterschiede in der Energieverbrauchsstruktur festzustellen (vgl. Abb. 2).

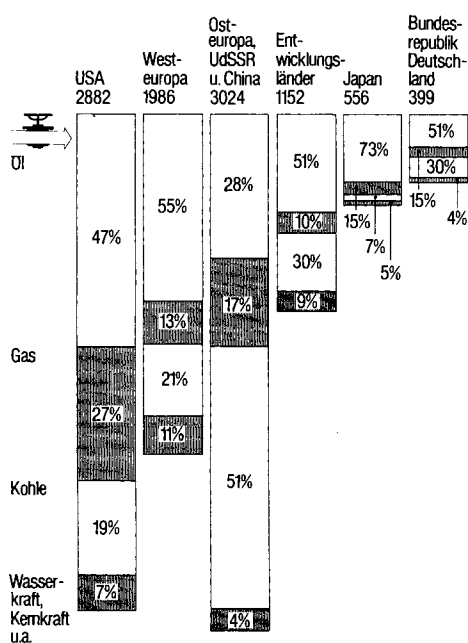


Abb. 2. Regionaler Energieverbrauch im Jahre 1978 (in Mio t SKE).

Von den Auswirkungen der „Ölkrise“ bleiben nach Aussage von Abbildung 2 Osteuropa, UdSSR und China weitgehend verschont, weil in diesen Regionen das Erdöl als Energieträger die geringste Rolle spielt. Auch wird deutlich, welche enormen Anstrengungen erforderlich sind, um die Verbrauchsstrukturen, insbesondere der westlichen Industrieländer, aufs neue zu ändern. Dabei muß man annehmen, daß die Einführung eines neuen Energieerzeugungssystems oder die Umstellung auf eine andere Rohstoffbasis nach allen Erfahrungen, die wir mit Kohle, Erdöl, aber auch mit Atomenergie gemacht haben, vom Zeitpunkt der technischen Verfügbarkeit bis zum Erreichen eines hohen Marktanteils mindestens 20 bis 30 Jahre bedarf.

Wir werden demnach bis zur Jahrtausendwende nur auf die Energien und Rohstoffe zurückgreifen können, deren Gewinnung heute bereits technologisch ausgereift, ökonomisch und ökologisch akzeptabel und sicher beherrschbar ist. Daraus folgt, daß mögliche Alternativen zur künftigen Energie- und Chemierohstoffbeschaffung jetzt geklärt werden müssen und ordnende Perspektiven das Gesetz des Han-

delns zu bestimmen haben. Aus kurzfristigen Bedarfsüberlegungen sind langfristige Strategien nicht abzuleiten.

Die „Akzeptanzkrise“, auf die gegenwärtig die Nutzung und dringend erforderliche weitere Erschließung der Kernenergie stößt, ist ein typisches Beispiel dafür, daß wir nicht oder noch nicht imstande sind, die Weichen für die Entwicklung über das Jahr 2000 hinaus zu stellen. Sie ist stark geprägt von einer irrationalen Technologiefurcht. Unbestimmte und sich zum Teil widersprechende Aussagen über die Endlichkeit fossiler Reserven und ihre Bedeutung für die Menschen im „Raumschiff Erde“ haben die Orientierung ebenfalls nicht leichter gemacht. Häufig wird nicht beachtet, daß es zwischen Reserven und Ressourcen an fossilen Energieträgern zu unterscheiden gilt: Reserven sind als gesicherte und unter den gegenwärtigen Förderbedingungen gewinnbare Vorräte definiert; Ressourcen sind der umfassendere Begriff für geologisch wahrscheinliche und mit erheblichem Mehraufwand irgendwann zugängliche Lagerstätten. Die Grenzen zwischen Reserven und Ressourcen werden sich als Folge des technologischen Fortschritts laufend verschieben. Bisher bleibt der förderbare Anteil mit ca. 3200 Mrd t SKE weit hinter dem geschätzten Weltvorkommen an fossilen Energieträgern von ca. 12000 Mrd t SKE zurück^[1]. Bezieht man in diese Betrachtung das Energiepotential ein, das aus Kernenergie und den sogenannten Endlosenergien hinzukommen kann, so mag man die fossilen organischen Rohstoffe als unerschöpflich ansehen.

Die langfristige Energie- und Rohstoffversorgung ist also weniger ein Problem mangelnder Ressourcen, sondern konzentriert sich mehr und mehr auf deren rechtzeitige Verfügbarmachung. Knappheit kann viele Ursachen haben – auf keinen Fall dürfen wir den Faktor Zeit unterschätzen. Gerade die jüngsten Erfahrungen haben gezeigt, daß sich die Veränderungen der Gegebenheiten oft rascher vollziehen als Möglichkeiten gefunden werden können, ihnen erfolgreich zu begegnen.

Die moderne Energiewirtschaft gibt es erst seit drei Generationen. Damit sie in der vierten oder fünften Generation nicht in eine Sackgasse führt, dürfen wir die derzeitige Energieverbrauchsstruktur, wie sie aus Abbildung 3 hervorgeht, nicht fortsetzen^[2].

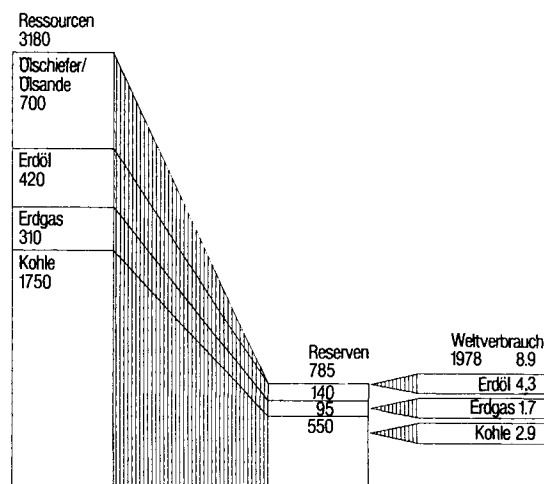


Abb. 3. Förderbare fossile Energieträger aus Reserven und Ressourcen (in Mrd t SKE).

So sind die förderbaren Kohlevorräte mindestens viermal, wahrscheinlich sogar fünfmal größer als die Erdölvorräte;

zwischen Vorkommen und Verbrauch besteht ein krasses Mißverhältnis. Abbildung 3 läßt auch eine Abschätzung zu, wie lange der Raubbau an den nicht regenerativen Naturprodukten noch möglich ist. Erdöl reichte bei unverändertem Verbrauch nur für Jahrzehnte, Kohle für wenige Jahrhunderte. Die Situation verschlechtert sich noch, wenn wir uns das weitere Wachsen des Energiebedarfs vor Augen halten.

Mehr Energie brauchen wir auf jeden Fall, gerade wenn wir die Umwelt schonen und sparsam mit den wertvollen, nicht regenerativen Naturprodukten umgehen wollen. Aber wieviel ist dieses „Mehr“? Die Vergangenheit hat uns gelehrt, daß Schätzungen die Realität um Größenordnungen verfehlen können und nichts so konstant ist wie die Veränderung aller in Prognosen und Bedarfsschätzungen eingehenden Daten. Dennoch erscheint mir eine qualitative Aussage über den Trend möglich.

Die Hauptschwierigkeit liegt in der Voraussage des Energie- und Rohstoffbedarfs pro Kopf der Weltbevölkerung. Sie führt zur Kardinalfrage: Für wieviele Menschen erwarten wir wann in welcher Region welchen Verbrauch? Zur Verdeutlichung des Prognoseproblems eignet sich Abbildung 4, die über den derzeitigen Primärenergieverbrauch pro Kopf und die Verteilung auf Länder und Regionen informiert^[3].

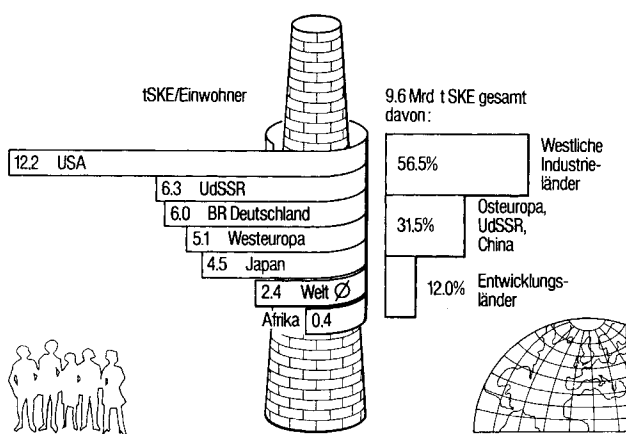


Abb. 4. Welt-Primärenergie-Verbrauch im Jahre 1978; in „5,1 t SKE/Einwohner Westeuropa“ ist der Wert für die Bundesrepublik Deutschland enthalten.

Gegenwärtig sind rund 4 Mrd Menschen mit Energie und Rohstoffen zu versorgen; um die Jahrtausendwende wird ihre Anzahl 6 Mrd, in 50 Jahren wahrscheinlich 8 Mrd erreichen oder überschreiten^[4].

Zunehmende Industrialisierung, insbesondere in den Entwicklungsländern, führt zwangsläufig zu einem weiter steigenden Primärenergieverbrauch. Es ist jedoch davon auszugehen, daß in Zukunft das Wirtschaftswachstum in den Industrieländern langsamer verlaufen und von einem flacheren Energie-Verbrauchsanstieg als bisher begleitet sein wird. Dabei wird unterstellt, daß ein Abbau der Energieverschwendung und die Optimierung der Energienutzung – besonders im nichtindustriellen Bereich – sich in erheblichem Maße verbrauchsdämpfend auswirken.

Nach Studien von Keyfitz^[5] ist in den kommenden 50 Jahren global mit einem Anstieg des Primärenergieverbrauchs von 2 t SKE auf 3–5 t SKE pro Einwohner und Jahr zu rechnen. Dies würde dann einen Gesamtverbrauch von 24–40 Mrd t SKE/Jahr ergeben – gegenüber 9,6 Mrd t SKE in 1978. Selbst bei zurückhaltenderer Schätzung wird in einigen

Jahrzehnten eine Verdopplung des Energieverbrauchs unausweichlich. Allein der Versuch, die geschätzte Primärenergiebedarfsentwicklung und -deckung, nach Energieträgern geordnet, graphisch darzustellen, ist des Nachdenkens wert^[6].

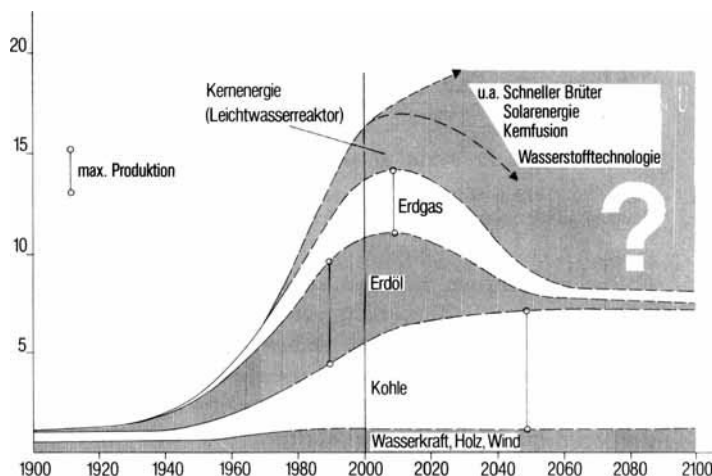


Abb. 5. Entwicklung des Welt-Primärenergie-Verbrauchs (in Mrd t SKE).

So soll Abbildung 5 zeigen, daß es für die Zeit nach dem Jahre 2000 immer schwieriger wird, konkrete Aussagen über den Anteil der Verwendung konventioneller und noch zu entwickelnder Energiequellen zu machen. Wichtig erscheint besonders die Einsicht, daß die Reichweite der fossilen Ressourcen über das Jahr 2000 hinaus entscheidend mitbeeinflusst wird vom wissenschaftlichen und technischen Fortschritt, d. h. von unserer Fähigkeit, neue Energiequellen zu erschließen sowie ihre Nutzung rechtzeitig zur technischen Reife zu entwickeln.

Obwohl den Prognosen der Primärenergiebedarfsentwicklung für die achtziger und neunziger Jahre eine größere Wahrscheinlichkeit beizumessen ist, kann der Trend der Bedarfsdeckung keineswegs befriedigen. Abbildung 5 macht deutlich, daß wir die Hoffnung, die Energieverbrauchsstruktur bereits kurzfristig nachhaltig ändern zu können, wohl aufgeben müssen. Es wäre schon ein Erfolg, wenn sich in dieser Zeitspanne der Erdölverbrauch einschränken ließe. Dennoch wird auch im Jahre 2000 dem Erdöl der größte Beitrag einzelner Energieträger abverlangt werden.

Diese Aussage findet ihre Bestätigung in einer kürzlich veröffentlichten Studie der Deutschen Shell AG über die Primärenergiebedarfsentwicklung und -verbrauchsstruktur der Bundesrepublik Deutschland bis zum Jahre 2000^[7]. Sie sei hier in graphischer Form präsentiert (Abb. 6), die ohne zusätzlichen Kommentar auskommt.

Von vitaler Bedeutung bleibt die Streckung aller fossilen, nicht regenerativen Energieträger. Hierzu könnte bei zügigem Ausbau sowohl national als auch global bereits mittelfristig die Nutzung der Kernenergie beitragen. Diese Energiequelle ist nach dreißigjähriger Entwicklungsarbeit technisch ausgereift, im Hinblick auf die Umweltbelastung mit Schadstoffen der Kohle und dem Erdöl vorzuziehen und der Energieerzeugung aus fossilen Brennstoffen wirtschaftlich überlegen^[8]. Sie bietet derzeit die einzige ins Gewicht fallende Alternative zur Verbrennung von Erdöl und Erdgas.

Auch die Kohle wird in Form ihrer Umwandlungsprodukte einen größeren Beitrag zur Deckung des Energiebedarfs

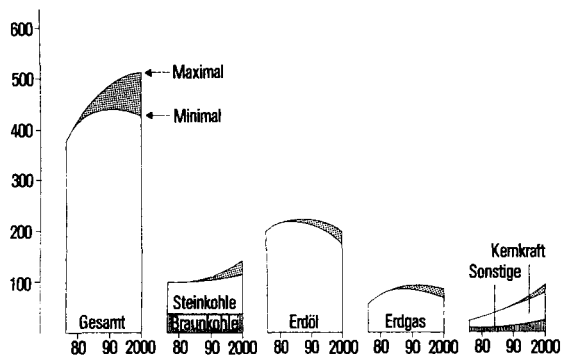


Abb. 6. Voraussichtliche Primärenergie und Energieträger in der Bundesrepublik Deutschland für die Zeitspanne 1978–2000 (in Mio t SKE).

übernehmen müssen. Hingegen sollte Erdgas angesichts seiner begrenzten Verfügbarkeit vorwiegend der Veredlung durch die Chemie vorbehalten bleiben. Leider erscheint dieses Ziel selbst mittelfristig kaum erreichbar, auch wenn die Erdgasverstromung aufgrund energiepolitischer Präferenz der Steinkohle rückläufig sein dürfte.

Die über das Jahr 2000 hinausgehende Bedarfsprognose unterstreicht die Dringlichkeit der Rohstoffentflechtung für die Bereiche Energie und Chemie. Sie erfordert eine tiefgreifende Umstrukturierung und nicht nur eine Kurskorrektur. Vor allem verlangt sie Mut und Einsicht in die Notwendigkeit der Veränderung. Eine sowohl auf Wasserstoff als auch auf elektrischem Strom aufbauende Energiewirtschaft – unter Nutzung von „Endlosenergien“ – wäre ein erstrebenswertes, jedoch noch fernes Ziel, um die Reserven an fossilen organischen Rohstoffen für eine Verwertung mit höherer Wertschöpfung und für Fälle fehlender Substituierbarkeit noch lange verfügbar zu halten. Zweifelsohne gehört die nahe Zukunft dem Energieverbund, der Nutzung aller Energiequellen – vor allem der Partner Kohle und Kernenergie.

2. Rohstoffsicherung durch Strukturwandel

Gemessen am Welterdölverbrauch von 3 Mrd t im Jahre 1978 ist der Anteil erdölstämmiger Ausgangsstoffe für die Chemie in der Größenordnung von 5 bis 6% scheinbar unbedeutend.

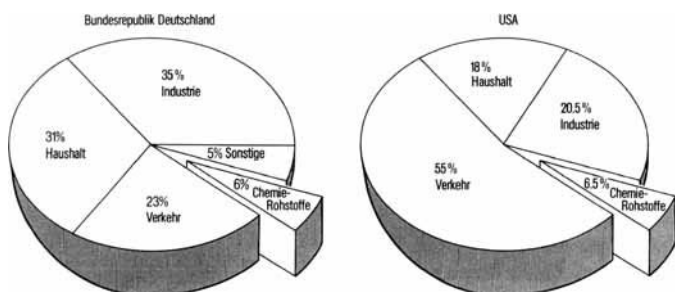


Abb. 7. Erdölverbrauch, aufgeschlüsselt nach Sektoren (Bundesrepublik Deutschland 1976 [9], USA 1975 [10]).

Diese Daten (vgl. Abb. 7) verführen leicht zu Fehlinterpretationen, da sie die wahre Abhängigkeit der chemischen Industrie vom Erdöl nicht offenkundig machen. Sie wird erst deutlich durch die Feststellung, daß die Primärchemikalien der organischen Chemie heute nahezu ausschließlich auf petrochemischer Basis gewonnen werden. Die Entwicklung

zum Status quo setzte zunächst in USA und Anfang der fünfziger Jahre dann auch in Europa ein und hatte im wesentlichen zwei Ursachen: Zum einen standen die für eine Verwendung in der Chemie bevorzugten Erdöl- und Erdgasfraktionen, vor allem Rohbenzin, Ethan, Propan und LP-Gas, in steigender Menge preisgünstig zur Verfügung, was die Ausarbeitung von Pyrolyseverfahren zur Herstellung der wichtigsten olefinischen und aromatischen Chemiebausteine stimulierte. Zum anderen wurden neue Verfahren zur Olefinpolymerisation sowie zur Herstellung von Monomeren auf olefinischer Basis gefunden. Beide Entwicklungen waren durch viele Wechselbeziehungen und Rückkopplungen eng miteinander verbunden und leiteten schrittweise die Ablösung des Acetylen als Ausgangsstoff für die klassischen Monomere ein.

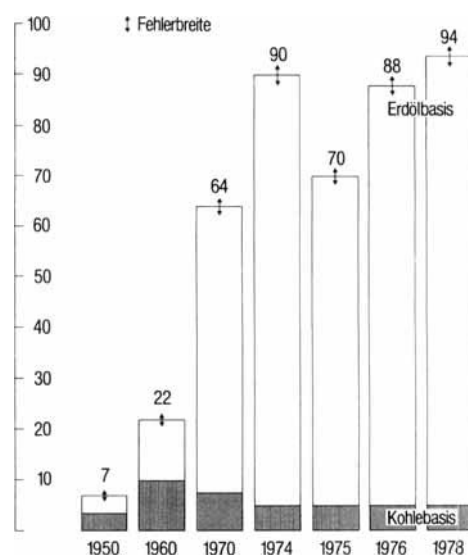


Abb. 8. Weltproduktion organischer Primärchemikalien (in Mio t; ohne Osteuropa, UdSSR, China).

Abbildung 8 zeigt die Entwicklung der letzten drei Dekaden und läßt das Ausmaß und die Bedeutung der aus Erdöl stammenden Ausgangsstoffe für die chemische Industrie erkennen. Nur 5% der Primärchemikalien stammen zur Zeit noch aus Kohle.

Die Abhängigkeit der organischen Veredlungs- und Polymerisationsprodukte von bestimmten, in der Menge begrenzten Erdöl- oder Erdgasfraktionen ist evident, und es ist zu erwarten, daß der Wert dieser chemischen Produkte für viele andere Industriezweige auch in Zukunft überproportional wachsen wird.

Für die Energiesicherung gibt es mehrere Möglichkeiten, zur Versorgung mit organischen Rohstoffen kann hingegen Erdöl nur sehr viel schwieriger substituiert werden. Die Veredlung des Erdöls muß gegenüber der Verbrennung immer Vorrang haben, weil für die Energieerzeugung keine wasserstoffhaltigen Kohlenstoffverbindungen notwendig sind, während sie für die Erzeugung der wichtigsten chemischen Produkte essentiell und im Erdöl bereits im gewünschten C/H-Verhältnis vorgebildet sind.

Die logische Konsequenz für die Wettbewerbsfähigkeit eines alternativen Chemierohstoffes ist damit vorgezeichnet. Sie ist nicht nur eine Funktion des Einstandspreises des Basisprodukts, sondern schließt die für die Herstellung von Primärchemikalien aufzuwendenden Veredlungs-, Fertigungs- und Kapitalkosten mit ein.

Unter den derzeitigen wirtschaftlichen und umwandlungstechnologischen Gegebenheiten kann Kohle als Chemierohstoff mit Erdöl nicht konkurrieren. Eine Ausnahme ist die Gewinnung anellierter Polycyclen, die jedoch mengenmäßig nicht ins Gewicht fallen. Wohl aber vermag Kohle nach Schaffung einer dem erhöhten Bedarf (Produktion, Verarbeitung) angepaßten Infrastruktur mittelfristig zu einer spürbaren Entlastung des Erdöls und des Erdgases beizutragen – in Form der Kohlevergasungs- und Kohleverflüssigungsprodukte für den Heiz- und Kraftstoffsektor.

Die Erschließung der Ölschiefer- und Ölsandvorkommen ist zwar in Angriff genommen worden; sie erweist sich aus technologischer und ökologischer Sicht mühsamer als zunächst erwartet und wird in diesem Jahrhundert keine nennenswerten Auswirkungen auf die Rohstoffversorgung haben.

Die viel diskutierten Möglichkeiten zur Rohstoffgewinnung aus nachwachsenden Naturprodukten werden nach meiner Auffassung weit überschätzt. Zur Deckung des Primärchemikalienbedarfs werden sie global keinen entscheidenden Beitrag leisten und regional auf wenige Produkte beschränkt bleiben. Den Vorzug hat die Veredlung der Naturprodukte und die Verwertung der Abfallstoffe. Hier eröffnet sich ein vielversprechendes Arbeitsgebiet für die im Aufbau befindliche Biotechnologie.

Bei realistischer Einschätzung aller Faktoren sind wir von einer „Nachölwirtschaft“ für die Chemie noch weit entfernt. Sie wird ihren Ausgang nehmen in einer stärkeren Verflechtung von Erdöl mit Kohle unter Berücksichtigung der spezifischen Veredlungsmöglichkeiten für beide Rohstoffe. Im einzelnen zeichnen sich aus heutiger Sicht die in den folgenden Abschnitten skizzierten Entwicklungen und Prioritäten ab.

2.1. Optimierung der Rohölveredlung

Noch in den achtziger Jahren erscheint eine merkliche Steigerung des Rohölveredlungsgrades im Sinne der Chemie möglich und dringend geboten.

Die Umstrukturierung der in Westeuropa vorwiegend betriebenen konventionellen Raffinerien in petrochemische Raffinerien ist hierfür Voraussetzung und ermöglicht die Erhöhung der Naphthaausbeute von 23 auf maximal 60%. Dadurch wird der spezifische Rohölbedarf für Primärchemikalien aus Erdöl auf nahezu ein Drittel gesenkt (vgl. Abb. 9)^[11]. Allerdings erfordert diese Ausrichtung der Raffineriestruktur, wie sie in den USA praktiziert wird, zusätzliche Investitionen.

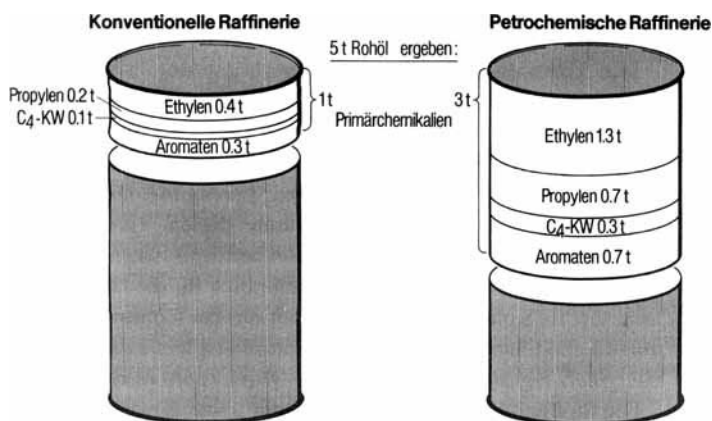


Abb. 9. Primärchemikalien aus Erdöl: Einfluß der Raffineriestruktur [11].

Neben der erhöhten Gewinnung von Primärchemikalien hat die petrochemische Raffinerie gegenüber der konventionellen Raffinerie den weiteren Vorteil, daß sich ihre Produktion dem Bedarf der chemischen Industrie an unterschiedlichen Primärchemikalien weitgehend anpassen ließe (vgl. Abb. 10). Die Ausbeutesteigerung wird erreicht durch den Betrieb von Crackanlagen mit Benzin und Gasöl, durch Konversionsanlagen zur Umwandlung schwerer Mineralölfractionen in leichtere Fraktionen und durch stärkeren Rückgriff auf Schweröl zur Erzeugung wasserstoffreicher Synthesegase durch partielle Oxidation. Die wesentlichen Verfahrensmerkmale zur optimalen Nutzung von Rohöl als Chemierohstoff sind Abbildung 10 zu entnehmen^[12].

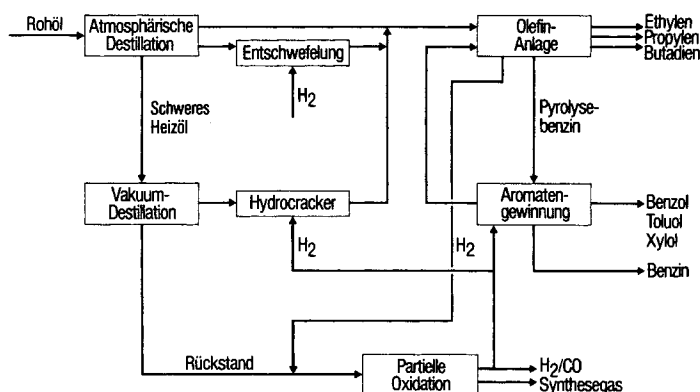


Abb. 10. Fließschema einer petrochemischen Raffinerie.

2.2. Optimierung der Rohölförderung

In ständiger Weiterentwicklung befindet sich die Optimierung der Explorations- und Fördertechnik. Es ist vorherzusehen, daß sie sich zunehmend auf Offshore- und andere schwer erschließbare Lagerstätten erstrecken wird. Sie erfordert große technische Anstrengungen und einen hohen Kapitaleinsatz. Gleichrangig ist das Gebiet der Bohr- und Erdölhilfsmittel für die Sekundär- und Tertiärförderung zu bewerten. Durch chemische Zusätze, die unterschiedliche Aufgaben zu erfüllen haben, wird mittelfristig die Anhebung des Entölungsgrades von 25 bis 30% auf 40 bis 50% und mehr angestrebt.

2.3. Ausbau der Kohleveredlung

Mit fortschreitender Rohölverknappung und -verteuerung kommt der Symbiose von Erdöl und Kohle als Basis für Chemierohstoffe steigende Bedeutung zu.

Die Herstellung der Primärchemikalien aus Kohle ist grundsätzlich möglich und fußt auf Verfahren, die in den zwanziger und dreißiger Jahren in Deutschland entwickelt und während des Zweiten Weltkrieges in unserem Lande auch großtechnisch angewendet wurden. Dabei erfolgte die Umwandlung der Kohle auf zwei grundverschiedenen Wegen.

Bei der Fischer-Tropsch-Synthese ist zunächst eine Vergasung der Kohle zu Synthesegas – d. h. zu Kohlenmonoxid und Wasserstoff – erforderlich, das seinerseits katalytisch in aliphatische Kohlenwasserstoffe unterschiedlicher Struktur und Kettenlänge umgewandelt wird.

Bei der Kohlehydrierung nach dem Bergius-Pier-Verfahren sowie bei der hydrierenden Extraktion nach dem Pott-Broche- oder dem IG-Uhde-Verfahren wird durch Wasser-

stoffanlagerung eine partielle Spaltung und damit Verflüssigung der Kohle erreicht. Diese Prozesse ohne totalen Abbau der Kohle eignen sich bevorzugt zur Herstellung von aromatenreichen Kohlenwasserstoff-Fractionen, der thermische Wirkungsgrad ist hierbei höher als bei der Fischer-Tropsch-Synthese^[13].

Bis 1945 waren in Deutschland zwölf Hydrier- und neun Fischer-Tropsch-Anlagen in Betrieb, ihre durchschnittliche Kapazität lag bei 400 000 t/a bzw. unterhalb 100 000 t/a. In den fünfziger Jahren schloß eine Arbeitsgemeinschaft der Firmen Ruhrchemie und Lurgi mit dem südafrikanischen Unternehmen Sasol einen Vertrag über die Errichtung einer Fischer-Tropsch-Anlage (Arge-Verfahren). Dieses Werk in Südafrika hat den Vorteil leicht abbaubarer Kohlevorräte und stellt heute als einzige Fischer-Tropsch-Anlage der Welt im technischen Maßstab (Festbettreaktoren) mit einer Kapazität von 270 000 t/a Kohlewertprodukte her^[14]. Unter „Kohlewertprodukten“ versteht man die Summe aller gasförmigen, flüssigen und festen Kohlenwasserstoffe. Kurz vor Inbetriebnahme steht eine zweite Anlage mit einer Kapazität von 2 Mio t/a, die nach dem Synthol-Verfahren der Firma Kellogg (Flugstaubreaktor) arbeiten wird. Eine weitere Anlage gleicher Größe ist in Planung.

Obwohl die Kohlevergasungs- und -verflüssigungstechnologie inzwischen weiterentwickelt wurde^[15] und auch die Synthesegas-Folgechemie ausbaufähig erscheint, bleibt das Veredlungspotential der Kohle weit hinter dem des Erdöls zurück.

Unter dem Gesichtspunkt ordnender Perspektiven, die nicht nur von ökonomischen, geologischen und politischen, sondern auch von den technologischen Gegebenheiten bestimmt werden, erscheint die Ausrichtung der Kohleveredlung – wie eingangs schon erwähnt – auf die zu erwartende Angebotsverknappung bei flüssigen Sekundärenergieträgern (Naphtha, Kraftstoff, Heizöl) vorrangig.

Dabei erfolgt der Einstieg in die Kohleveredlung vorzugsweise über die Kohlevergasung. Das anzuwendende Verfahren muß sich nach der Beschaffenheit der Kohle und dem angestrebten Veredlungszweck der Vergasungsprodukte richten. Bei allen Verfahren ließe sich der Kohleverbrauch, der erforderlich ist, um das hohe Temperaturniveau der Kohlevergasung zu erreichen, durch Einkopplung der Prozeßwärme von Hochtemperatur-Kernreaktoren senken^[16]. Der entscheidende Vorteil dieser zukunftsweisenden Technologie besteht darin, daß die Kohle dann nur noch als Rohstoff und nicht mehr als Wärmelieferant verwendet wird; unter optimalen Bedingungen sollte ein Ausnutzungsgrad von 0.8 und mehr zu erreichen sein. Die drastische Senkung des Kohleverbrauchs ist ein erstrebenswertes Ziel nicht zuletzt aber auch deshalb, um der zunehmenden Kohlendioxid-Anreicherung in der Atmosphäre und einer dadurch möglichen Klimaveränderung entgegenzuwirken. Diese könnte zum limitierenden Faktor schlechthin werden^[17].

Synthesegas kann wegen seines geringen Heizwertes und hohen CO-Gehaltes Naturgas als Heizgas im Haushalt allerdings nicht ersetzen. Im industriellen Bereich gibt es für das Schwachgas zur Energieerzeugung begrenzte Substitutionsmöglichkeiten. Die Weiterverarbeitung zu synthetischem Naturgas (SNG) oder die hydrierende Kohlevergasung sind Alternativen, die vorrangig weiterzuentwickeln sind.

Die klassische Kohlenoxid-Hydrierung nach *Fischer-Tropsch* ist außerordentlich kapitalintensiv und kommt nur

bei sehr günstigen Kohleestandkosten für die Gewinnung von Benzin und anderen Kohlenwasserstoff-Fractionen infrage. Sie erfordert mindestens 4 t Steinkohle pro 1 t Kohlewertprodukte.

Aussichtsreicher, wenn auch technisch noch nicht erprobt, erscheint das Mobil-Oil-Verfahren^[18], das Synthesegas zunächst in Methanol und dieses mit neuen Zeolith-Katalysatoren unter Dehydratisierung über Dimethylether in Kohlenwasserstoffe mit hohem Aromatenanteil umwandelt. Ausgehend von einem spezifischen Verbrauch von 1.3 bis 1.5 t Steinkohle pro 1 t Methanol errechnet sich ein Gesamtkohleverbrauch von ca. 3.4 t für die Herstellung von 1 t Kohlewertprodukte.

Modifizierte Katalysatoren könnten mit hoher Selektivität auch die Herstellung von C₂- bis C₄-Olefinen aus Methanol ermöglichen. Solange jedoch Erdölfraktionen noch verheizt werden, ist die Produktion von Kohlenwasserstoffen und Olefinen aus Synthesegas nicht nur ein höheren Rohstoff-, Energie- und Kapitalaufwand erfordernder Umweg, sondern auch umwandlungstechnologisch viel zu umständlich. Der ungünstige thermische Wirkungsgrad ist aber Anreiz, beim Übergang von Erdöl auf Kohle die Olefinstufe für eine Reihe sauerstoffhaltiger Produkte zu umgehen.

Besondere Chancen haben solche Synthesegas-Folgeprodukte, in denen die CO-Komponente ganz oder teilweise wiederzufinden ist. Die Verfahrenskette Kohle-Synthesegas-Methanol-Essigsäure-Folgeprodukte ist ein typisches, kalkulierbares Beispiel.

Die Verwendung von Braunkohle statt Methan für die Synthesegaserzeugung hat bei der heutigen Kosten-Preis-Relation zwar noch eine deutliche Kostenerhöhung zur Folge, ist der Verwendung von Naphtha jedoch bereits überlegen und der von schweren Erdölfraktionen gleichzusetzen.

Als Alternative zum leichten Heizöl für den Haushaltssektor bietet sich ferner die Umwandlung schwerer in leichte Erdölfraktionen durch hydrierende Crackung an. Bei fortschreitender Verknappung muß schließlich die Weiterentwicklung der Kohleverflüssigung in zwei Richtungen in Betracht gezogen werden: Zum einen ließen sich aus Kohle durch geringe Wasserstoffanlagerung und hydrierende Extraktion schwefel- sowie aschearme Brennstoffe für Kraftwerke und Industrieheizung gewinnen; zum anderen führt die katalytische Hochdruckhydrierung von Kohle zu einem wasserstoffreicheren Kohleöl, das in einer kohlechemisch ausgerichteten Raffinerie auch zu Benzin, Naphtha und Primärchemikalien weiterverarbeitet werden könnte^[19]. Bei der Entwicklung der einzelnen Prozeßabläufe und Veredlungsschritte wird man sich auf die umfangreichen Erfahrungen der Erdölverarbeitungstechnologie stützen können.

Den Vorteilen der direkten Kohleumwandlung in Kohleverflüssigungsprodukte stehen als Nachteile vor allem der hohe Wasserstoffbedarf und der hohe Aufwand entgegen. In einer sinnvollen Kombination von hydrierenden Kohleextraktionen mit der Kohlevergasung zur Erzeugung des Wasserstoffs und des Synthesegases könnte diesem Handicap Rechnung getragen werden. Nach dem heutigen Erkenntnisstand beträgt der spezifische Kohleverbrauch für die Herstellung von 1 t Kohlewertprodukte durch direkte Kohlehydrierung ca. 3.6 t Steinkohle^[20]. Davon entfallen allein 1 t auf die Energieerzeugung und 1.36 t auf die Wasserstoffherstellung.

Die Stoßrichtung der Kohleveredlung sowie die der Kohlechemie und ihr Entwicklungspotential im Vergleich zum

Erdöl sind damit vorgezeichnet. Erstere zielt auf die Substitution erdölstämmiger Energieträger für den Haushalts-, Industrie- und Verkehrssektor, letztere auf die viel aufwendigere Gewinnung definierter organischer Primärchemikalien. Einen Überblick gibt Abbildung 11^[21].

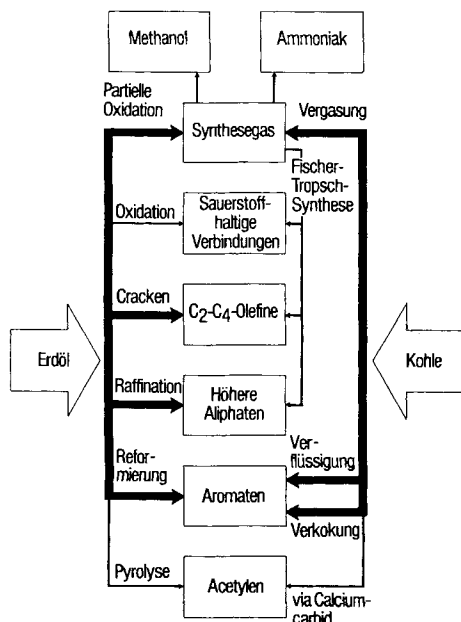


Abb. 11. Erdöl- und Kohleveredlung.

Bei realistischer Einschätzung der Substitutionsmöglichkeiten werden die Übergänge zu neuen Versorgungsstrukturen, die sich aus dem Erdöl-Kohle-Verbund ergeben, fließend sein und sich teilweise überlappen. Die regional sehr unterschiedlichen wirtschaftlichen Voraussetzungen sollen in dieser Betrachtung unberücksichtigt bleiben.

Änderungen der Verfügbarkeit erdöl- und kohlestämmiger Rohstoffe, wie sie mittel- und langfristig zu erwarten sind, werden sich auf die Vor- und Zwischenproduktverbundwirtschaft der chemischen Industrie auswirken. Die daraus erwachsenden Probleme sind lösbar, wenn sie rechtzeitig erkannt und aufgegriffen werden. Steigende Rohstoff- und Energiekosten lassen sich durch Einsparungen im Verbrauch bei dem hohen Entwicklungsstand der chemischen Industrie nur noch begrenzt auffangen. Sie werden das Preisgefüge aller Chemieprodukte in Zukunft nachhaltig beeinflussen und von Fall zu Fall auch Anlaß zu Verfahrensumstellungen sein.

3. Ist die Resubstitution der Kunststoffe in Sicht?

Ohne Zweifel wird die Rohstoffverteuerung am stärksten bei den Produkten mit den wenigsten Veredlungsstufen durchschlagen. Dazu gehört eine Vielzahl von Polymeren. Dies wirft die Frage nach der Resubstitution durch alternative Werkstoffe anorganischen oder organischen Ursprungs wie Metall, Glas oder Holz auf, zumal der Anstoß für die Wahl eines neuen Werkstoffs in der Regel vom Preis ausgeht. Unter Kostendruck werden nicht genutzte Werkstoffeigenschaften nicht honoriert. Das Regulativ bei einer Resubstitution von Kunststoffen wird jedoch nicht von der Preis-Eigenschafts-Charakteristik der Rohstoffe allein bestimmt, sondern auch von den Endkosten der Fertigerzeugnisse. Das

Ausmaß einer möglichen Substitution hängt also von mehreren Kostenfaktoren ab, die sich unter anderem auch aus der Verarbeitung, Formgebung und dem Finish ergeben. Aus heutiger Sicht ist keine beträchtliche Resubstitution zu erwarten, da die Kunststoffherzeugnisse bei Kapital-, Arbeits- und Energieaufwand gegenüber den aus Naturprodukten hergestellten Fertigerzeugnissen Kostenvorteile haben.

Die Vielfalt der Eigenschaften und Eigenschaftskombinationen hat Kunststoffen, Kunstharzen, Elastomeren und Synthesefasern große Märkte und neue Einsatzgebiete erschlossen. Sie sind in der Anwendungsbreite allen Naturprodukten weit überlegen, was den steilen Anstieg des Weltverbrauchs (vgl. Abb. 12) erklärt.

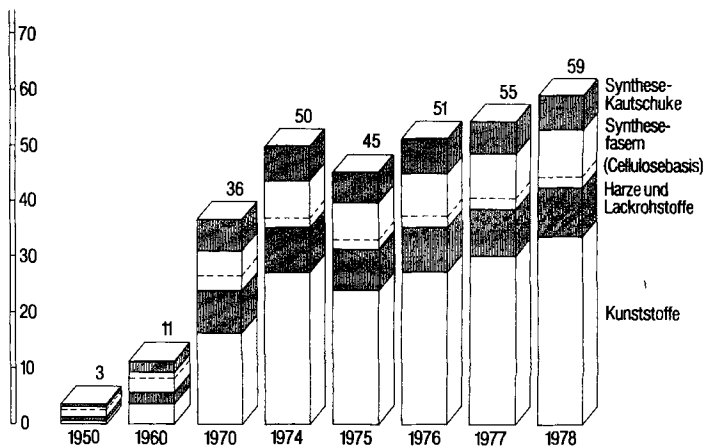


Abb. 12. Weltverbrauch (ohne Osteuropa, UdSSR, China) an synthetischen organischen Polymeren in den Jahren 1950 bis 1978 (in Mio t).

Auf dem Gebiet der Thermoplaste wird das Bild von den Standardkunststoffen Polyolefine (HDPE, LDPE, PP), Polyvinylchlorid (PVC) und Polystyrol (PS und EPS) geprägt. Verfolgt man die Verbrauchsentwicklung bei den Standardkunststoffen bis in das Jahr 1970 zurück, so fällt auf, daß die Anteile der einzelnen Kunststofftypen deutliche Verschiebungen zeigen (vgl. Abb. 13).

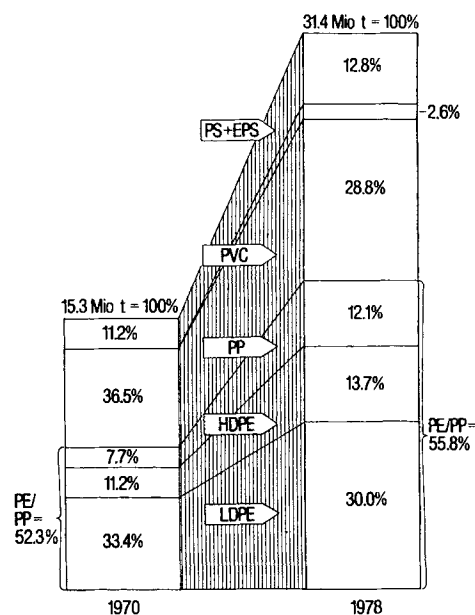


Abb. 13. Weltverbrauch an Standardkunststoffen (ohne Osteuropa, UdSSR, China) in den Jahren 1970 und 1978 (PS = Polystyrol, EPS = Schaumpolystyrol, PVC = Polyvinylchlorid, PP = Polypropylen, HDPE = Niederdruckpolyethylen, LDPE = Hochdruckpolyethylen).

Diese Entwicklung läßt erkennen, daß der Anstoß zur Substitution der Standardkunststoffe untereinander bei gleichwertiger Verarbeitbarkeit und Formgestaltung vor allem vom Preis-Eigenschafts-Verhältnis beeinflusst wird. Die Variationsmöglichkeiten der Eigenschaftsprofile haben den Anwendungsbereich von Kunststoffen wesentlich erweitert und damit ihre Austauschbarkeit erleichtert. Dieser Trend wird sich fortsetzen und ist Ausdruck der Dynamik des Marktes und der Kreativität.

Grundlegend neue Standardkunststoffe sind kaum zu erwarten. Vielmehr wird die Weiterentwicklung der bekannten Kunststoffklassen durch gezielte Kombination und Variation der physikalischen und mechanischen Eigenschaften im Hinblick auf das jeweilige Anwendungsgebiet im Vordergrund stehen. Voraussagen über mögliche Verbrauchsstrukturänderungen sind schwierig. In den meisten Fällen wird für die großen Einsatzgebiete die bereits erwähnte Kosten-schere entscheidend sein.

Standardkunststoffe werden durch eine Vielzahl hochwertiger Kunststoffe sinnvoll ergänzt, die als Polymerwerkstoffe zunehmend an Bedeutung gewinnen und sich durch ein hohes Entwicklungspotential auszeichnen. Ihrer Substitution untereinander sind enge Grenzen gesetzt, weil für Polymerwerkstoffe ganz spezifische Eigenschaftskombinationen gefordert werden, die aus Gründen der Sicherheit und Gebrauchstüchtigkeit keine Kompromisse erlauben.

Hingegen wird sich die Verdrängung von Metallen wie Zink, Aluminium, Kupfer und Eisen durch Polymerwerkstoffe verstärkt fortsetzen, insbesondere in den Sektoren Wohnungs-, Fahrzeug- und Maschinenbau. Ausgelöst wurde dieser Substitutionsprozeß durch den höheren Energieverbrauch bei der Metallgewinnung und -verarbeitung^[22, 23] (vgl. Abb. 14).

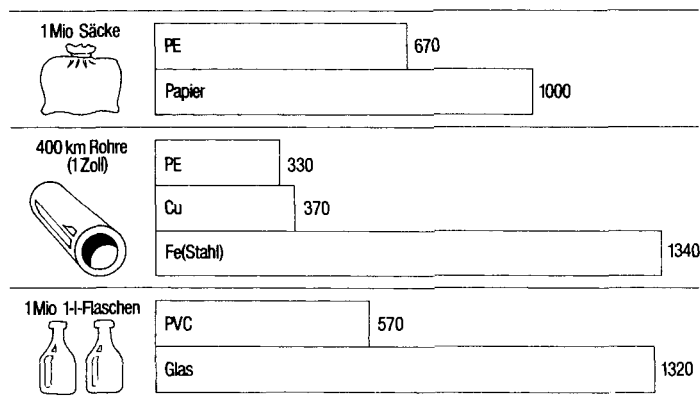


Abb. 15. Fertigprodukte und Energieverbrauch in t SKE.

werkstoffe weiter an Boden gewinnen. Mit der Entwicklung des Spritzgießverfahrens für härtbare Formmassen und der Beherrschung weiterer Verarbeitungsprobleme verliert die Frage nach der Substitution der Duomere durch Thermoplaste an Aktualität. In ihrem Eigenschaftsprofil heben sich die Duomere von den thermoplastisch verarbeitbaren Polymerwerkstoffen nutzbringend ab.

Aufgrund der Rohstoff- und Energieeinsparung werden sich auch die Einsatzgebiete für hochgefüllte Kunststoffe, d. h. Kombinationen aus Polymeren und anorganischen Zuschlagstoffen, ausweiten. Das gleiche gilt für Schaumstoffe, insbesondere auf Polystyrol- und Polyurethanbasis. Zunehmende Anwendung finden sie im Wohnungsbau zur Wärmeisolation und in Form von Strukturschäumen als Werkstoffe für die Leichtbauweise. Auf dem großen und vielseitigen Gebiet der Verpackung schreitet der Substitutionsprozeß zugunsten von Folien auf petrochemischer Basis weiter voran. Dies gilt vor allem für Polypropylen wegen seines niedrigen Preises, seiner hohen Wärmeformbeständigkeit und geringen Wasserdampfdurchlässigkeit.

Bei allen Kunststoffen wird sich der Druck zur Wieder- und Abfallverwertung verstärken. Einige technisch und wirtschaftlich gangbare Wege zeichnen sich sowohl für die Wiederverwendung als auch für die indirekte Verwertung von Kunststoffabfällen durch Pyrolyse oder Hydrolyse zu niedermolekularen Kohlenwasserstoffverbindungen ab. Das Innovationspotential ist damit keineswegs ausgeschöpft. Diese Hinweise mögen aber die Aussage erhärten, daß das Polymergebiet weiterhin an Umfang und Bedeutung zunehmen wird.

Engpässe in der Rohstoffversorgung sind vorübergehend nie auszuschließen. Die große Variationsbreite der Kunststoffe ist ein charakteristisches Merkmal dieses Produktionszweiges, der schon in der Vergangenheit bewiesen hat, daß er sich auf veränderte Rohstoff-Situationen schnell einstellen kann.

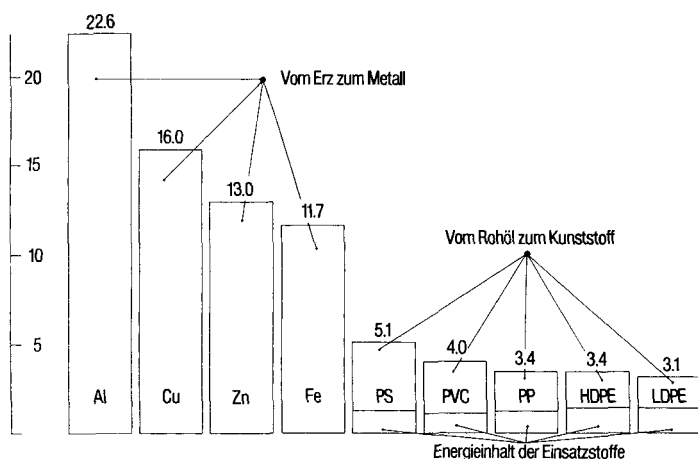


Abb. 14. Werkstoffe und Energieverbrauch in t SKE/m³.

Werkstoffgerechte Konstruktionen von Kunststoff-Formteilen führen im Vergleich zur Serienverarbeitung von Metallen zu Einsparungen bei der Nachbearbeitung und Montage. Diese schlagen sich, insbesondere durch Lohn-einsparung, ebenfalls in den Fertigungskosten nieder. Der wirtschaftliche Anreiz zur vermehrten Substitution von konventionellen Werkstoffen durch Polymerwerkstoffe wird bei steigenden Energiekosten anhalten. Drei Beispiele in Abbildung 15 sollen diese Aussage stützen^[24].

Unter dem Aspekt höherer Wertschöpfung werden auch verstärkte Thermoplaste und Duomere als Konstruktions-

4. Resümee

Kehren wir zum Ausgangspunkt unserer Überlegungen „Rohstoff-Polymer-Verbund, Gegenwart und Zukunft“ zurück. Was ist das Fazit?

Auf keinen Fall dürfen wir morgen so weitermachen wie wir gestern begonnen haben. Die Energie- und Rohstoffversorgung wäre bereits mittelfristig nicht mehr gesichert. Wir müssen also neue Wege einschlagen, die zu tiefgreifenden

Strukturänderungen führen. Wir haben vor allen Dingen keine Zeit mehr zu verlieren, wenn wir das Rennen gegen die Probleme unserer Welt von morgen gewinnen wollen.

Ich hoffe, der Wille und nicht erst die Not kann einiges, ich wünsche, die Einsicht in die Notwendigkeit kann vieles, ich glaube, Intelligenz und weise Beschränkung können alles bewirken.

Dr. F. Kluge und Dr. W. Scheibitz danke ich für ihre Mitarbeit bei der inhaltlichen und graphischen Gestaltung der Abbildungen.

Eingegangen am 13. November 1979 [A 308]

- [1] W. Oehme, Umschau 79, 495 (1979).
- [2] F. Barthel, P. Kehr, J. Koch, F. K. Mixius, D. Weigel in „Die zukünftige Entwicklung der Energienachfrage und deren Deckung“, Studie der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover 1976.
- [3] Die Zeit, 34. Jahrgang, 20. Juli 1979.
- [4] W. Häfele, Vortrag, ACHEMA 79, Frankfurt am Main, 19. Juni 1979.

- [5] N. Keyfitz: Population of the World and its Regions 1975–2030. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg 1977.
- [6] In Anlehnung an E. Edye, Erdoel Kohle 31, 68 (1978).
- [7] Aktuelle Wirtschaftsanalyse, Deutsche Shell AG, August 1979.
- [8] W. Schüller, Umschau 77, 41 (1977).
- [9] G. Winter, Tech. Rundsch. 71, Nr. 27, S. 2 (3. Juli 1979).
- [10] R. L. Loftness: Energy Handbook 1978. Van Nostrand Reinhold Co., New York 1979, S. 147.
- [11] In Anlehnung an K. Stork, M. A. Abrahams, A. Rhoe, Hydrocarbon Process. 54, Nov. 1974, 157.
- [12] H. J. Madsack, U. Buskies, Erdoel Kohle 30, 31 (1977).
- [13] Übersicht: K. F. Schlupp, H. Wien, Angew. Chem. 88, 348 (1976); Angew. Chem. Int. Ed. Engl. 15, 341 (1976).
- [14] J. C. Hoogendorn, Gas Waerme Int. 25, 283 (1976).
- [15] H. Franke, Chem. Ing. Tech. 50, 917 (1978).
- [16] R. Schulten, Erdoel Kohle 24, 334 (1971).
- [17] J. Williams: Carbon Dioxide, Climate and Society, Proc. JJASA Workshop, 21.–24. February 1978. Pergamon, Oxford 1978.
- [18] S. L. Meisel, J. P. McCullough, C. H. Lechthaler, P. B. Weisz, Chem. Technol. 6, 86 (1976).
- [19] H. G. Franck, Chem. Ind. (Duesseldorf) XXXI, 377 (1979).
- [20] H. Jüntgen, Glueckauf 115, 329 (1979).
- [21] Vgl. Nachr. Chem. Tech. Lab. 25, 227 (1977).
- [22] A. H. Smolders, Kunststoffe 69, 419 (1979).
- [23] Chem. Week, Ausgabe vom 28. 3. 1979, S. 20.
- [24] P. J. Bakker, Vortrag, Assoc. Plast. Manuf. Europe, Amsterdam, 19. Juni 1979.

Chemie und Funktion der Human-Plasmaproteine

Von Hans-Gerhard Schwick und Heinz Haupt^[*]

Professor Rolf Sammet zum 60. Geburtstag gewidmet

Das Blutplasma des Menschen enthält eine Fülle von Proteinen. Neue analytische und präparative Techniken haben es ermöglicht, bis jetzt mehr als hundert dieser Proteine zu isolieren; etwa neun Zehntel davon wurden erst in den letzten 30 Jahren charakterisiert. Zu den Plasmaproteinen gehören Komponenten des Gerinnungs- und des Komplementsystems sowie Proteinase-Inhibitoren, Immunglobuline, Lipoproteine und Transportproteine. Bei einigen Plasmaproteinen ist die biologische Funktion noch nicht bekannt. Der Mangel an einem oder mehreren Plasmaproteinen ruft meist schwere Gesundheitsstörungen hervor; bekanntestes Beispiel ist die Hämophilie. Aus Blutplasma werden mehrere biologisch aktive Proteine gewonnen, die – wie die Blutgerinnungsfaktoren – große prophylaktische und therapeutische Bedeutung haben und eine bessere Nutzung des kostbaren Plasmas ermöglichen als dessen Transfusion.

1. Einleitung

Vor 30 Jahren berichtete H. E. Schultze^[1] über „Die Plasmaeiweißkörper im Blickfeld des Chemikers“. Damals waren etwa zehn Proteine aus menschlichem Blutplasma rein isoliert und chemisch-physikalisch gut charakterisiert worden. Heute beträgt die Zahl der aus Blutplasma des Menschen isolierten Proteine mehr als 100. Ihr Nachweis und ihre Reindarstellung wurden vor allem in den letzten 15 Jahren durch die Entwicklung neuer analytischer und präparativer Techniken ermöglicht: Insbesondere durch immunologische Nachweistechiken wurde die große Vielfalt der Plasmaproteine erkannt, und vor allem durch präparative chro-

matographische Methoden gelang es dann schnell, zahlreiche Human-Plasmaproteine rein darzustellen (siehe Tabelle 1).

Für die Fraktionierung und Reindarstellung von Plasmaproteinen gibt es drei Hauptgründe:

1. die Gewinnung von prophylaktisch und therapeutisch wirksamen Proteinpräparaten aus menschlichem Blutplasma,
2. die Verwendung von Reinproteinen für die Gewinnung von Plasmaprotein-Antisera, die heute unentbehrliche Reagentien für die klinische Diagnostik sind und
3. die Verwendung von Reinproteinen für Strukturanalysen, z. B. die Bestimmung der Aminosäuresequenzen sowie Röntgen-Strukturanalysen, um die Funktion dieser Proteine auf molekularer Ebene aufklären zu können.

[*] Prof. Dr. H. G. Schwick, H. Haupt
Behringwerke AG, D-3550 Marburg/Lahn